UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

MÉMOIRE D'ÉTUDIANT

CASE POSTALE 6128, SUCCURSALE A, MONTREAL, QUEBEC H3C 3J7

ÉLABORATION DES HORAIRES POUR LES CHAUFFEURS DE VÉHICULES POSTAUX

par

Serge Taillefer

Mémoire de maîtrise présenté au département d'Informatique et de Recherche opérationnelle, Université de Montréal, et dirigé par Monsieur Jacques A. Ferland.

Cette étude a été publiée grâce à une subvention du fonds F.C.A.R. pour l'aide et le soutien à la recherche.

Université de Montréal
Centre de recherche sur les transports - Publication #557
Avril 1987

Dépôt légal - 1er trimestre 1988

TABLE DES MATIÈRES

Page

Table des illustrations.....v

Sommaire.....vi

Introduction.....1

CHAPITRE 1 - DESCRIPTION DU PROBLÈME.....3

1.1 Les tâches du chauffeur.....4
1.1.1 Tâches à points de demande fixes.....6
1.1.2 Activités à points de demande variables.....8
1.1.3 Activités connexes.....9
1.2 Répartition des tâches et activités sur le territoire.....9
1.3 Les journées de travail des chauffeurs.....10
1.3.1 Évaluation du coût d'une journée de travail.....11

CHAPITRE 2 - MODÉLISATION DU PROBLÈME ET APPROCHE GÉNÉRALE DE RÉSOLUTION.....13

2.1 Objectif et contraintes.....13
2.2 Modélisation : revue de la littérature.....14
2.3 Modélisation du problème d'horaire dans le contexte postal.....16
2.4 Résolution des modèles de recouvrement : revue de la littérature.....19
2.5 Méthode de résolution proposée.....23

CHAPITRE 3 - PHASE DE GÉNÉRATION DE JOURNÉES DE TRAVAIL.....26

3.1 Le générateur.....27
3.1.1 Algorithme de chaînage de tâches.....30
3.1.2 Mise à jour des chaînes.....34
3.2 Génération de journées de travail "vides".....36
3.3 Tâches à points de demande fixes sous la responsabilité de plusieurs ports d'attache.....37

TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

CHAPITRE 4 - PHASE DE SÉLECTION DE JOURNÉES DE TRAVAIL.....39

4.1 Relaxation et résolution du modèle de recouvrement avec contraintes supplémentaires.....40

4.2 Obtention d'une solution entière.....40

4.3 Obtention d'une borne sur la fonction économique.....46

4.4 Ordre de traitement des problèmes.....47

4.5 Arrêt du processus de résolution.....48

4.6 Découpage et insertion des activités à points de demande variables.....53

CHAPITRE 5 - RÉSULTATS NUMÉRIQUES.....56

5.1 Données utilisées.....56

5.2 Création d'une table de distance.....62

5.3 Étude de divers scénarios : Expérience no 1.....63

5.4 Étude de divers scénarios : Expérience no 2.....75

Conclusion.....79

Appendice.....81

Références.....89

Remerciements.....91

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Tableaux

1.1 Responsabilités des tâches et activités, secteur centre-ville.....10

4.1 Critères de branchement sur des sous-sommes.....44

5.1 Répartition des tâches à points de demande fixes et des activités à points de demande variables du secteur centre-ville.....51

5.2 Statistiques sur les tâches à points de demande fixes.....61

5.3 Caractéristiques des journées : Expérience no 1.....63

5.4 Statistiques générales : Expérience no 1.....65

5.5 Statistiques sur la phase de sélection : Expérience no 1.....68

5.6 Statistiques générales : Expérience no 2.....76

5.7 Statistiques sur la phase de sélection : Expérience no 2.....77

Figures

1.1 Secteurs de la division postale de Montréal.....3

1.2 Répartition des RTA et zones de succursale du secteur centre-ville.....5

2.1 Algorithme heuristique pour le modèle de recouvrement avec contraintes supplémentaires.....20

2.2 Algorithme de génération de colonnes pour le modèle de recouvrement avec contraintes supplémentaires.....21

2.3 Phase de la méthode de résolution proposée.....25

3.1 Graphe de précédence.....29

3.2 Problème de transport associé au chaînage de tâches.....33

4.1 Résolution du modèle relaxé.....41

4.2 Branchement de type 0-1 sur les variables fractionnaires.....42

4.3 Vue globale de la technique de branchement.....51

4.4 Exemple d'un arbre de branchement.....52

5.1 Distribution des cadres-horaires et des fenêtres de temps.....60

RÉSUMÉ

Nous considérons le problème d'élaboration des horaires pour les chauffeurs de véhicules postaux en milieu intra-urbain. Nous voulons résoudre ce problème de façon à minimiser le coût total des journées de travail réalisant un ensemble de tâches et activités, tout en respectant des contraintes opérationnelles et syndicales.

Un modèle de recouvrement avec contraintes supplémentaires est proposé pour ce problème. Nous avons développé un algorithme de type heuristique pour le résoudre. Cet algorithme se divise en deux grandes phases : une phase de génération de journées de travail admissibles et une phase de sélection de journées de travail. Ces deux phases sont ensuite suivies par une phase de découpage et insertion d'activités à points de demande variables. Finalement, le modèle et l'algorithme sont appliqués sur des données de la Société canadienne des postes.

Mots-clés : horaires; véhicules postaux; modèle de recouvrement; heuristique.

INTRODUCTION

L'organisation du transport postal en milieu intra-urbain se divise en deux grandes étapes distinctes mais complémentaires. La première en est une de production de tournées de véhicules (appelée communément "routing"). La seconde, notre point d'intérêt, consiste à agencer dans le temps ces tournées (ce qu'on appelle "scheduling"), i.e. élaborer des horaires pour les chauffeurs compatibles avec les tournées produites par le processus de "routing". Dans le contexte postal, l'ensemble des horaires résultant du processus d'agencement est désigné sous le terme "programme d'opérations".

L'élaboration des horaires de travail pour le transport postal est soumise à plusieurs contraintes. On doit tenir compte du cadre-horaire des tournées (i.e. de l'intervalle de temps durant lequel chaque tournée doit être effectuée), des activités connexes des chauffeurs (préparation et entretien du véhicule, pauses-café, repas, etc.). De plus, on doit respecter les règles définissant la structure d'une journée de travail des chauffeurs et un ratio entre le nombre de chauffeurs réguliers et à temps partiel.

Le but de ce mémoire est de développer un modèle tenant compte de tous les aspects décrits précédemment. Le système informatique qui en découlera s'avèrera un outil d'aide à la décision permettant au planificateur de mieux analyser divers scénarios en un temps relativement court, une tâche qui s'avère manuellement fort fastidieuse.

Ce type de systèmes a été développé dans plusieurs domaines en transport : transport en commun, transport aérien, transport scolaire,

transport des handicapés, etc. Dans la littérature, on ne retrouve qu'une seule application en transport postal, soit celle de Roack et al. [14]. Ces auteurs proposent un modèle basé sur la programmation dynamique et la théorie des files d'attente. Le modèle a été utilisé par le service postal américain dans la région métropolitaine de New York. Les auteurs rapportent des économies de l'ordre de 30% sur la solution produite manuellement par les planificateurs.

Après avoir décrit la problématique au chapitre 1, nous présentons au chapitre 2 un modèle de recouvrement avec contraintes supplémentaires ainsi que l'approche générale de résolution proposée, qui est de type heuristique. Les chapitres 3 et 4 décrivent en détail les deux principales phases de l'heuristique, soit une phase de génération de journées de travail admissibles et une phase de sélection de journées. Finalement, nous analysons au chapitre 5, différents résultats numériques obtenus sur les données du secteur centre-ville de la division postale de Montréal.

CHAPITRE 1
DESCRIPTION DU PROBLÈME

L'organisation du service postal se fait à l'intérieur de divisions, chacune desservant un territoire donné. À l'intérieur d'une division, nous retrouvons un ensemble de secteurs de distribution, chacun possédant son propre centre de traitement. Le processus de détermination des tournées et leur agencement spécifiant la journée de travail de chaque chauffeur est appliqué à l'intérieur de chacun de ces secteurs dans le cadre de la distribution du courrier et des colis. Notre intérêt est la distribution par petits camions (véhicules de ½ tonne). Ainsi par exemple, on retrouve trois secteurs de distribution dans la division de Montréal, soit les secteurs centre-ville, St-Laurent et Laval (figure 1.1).

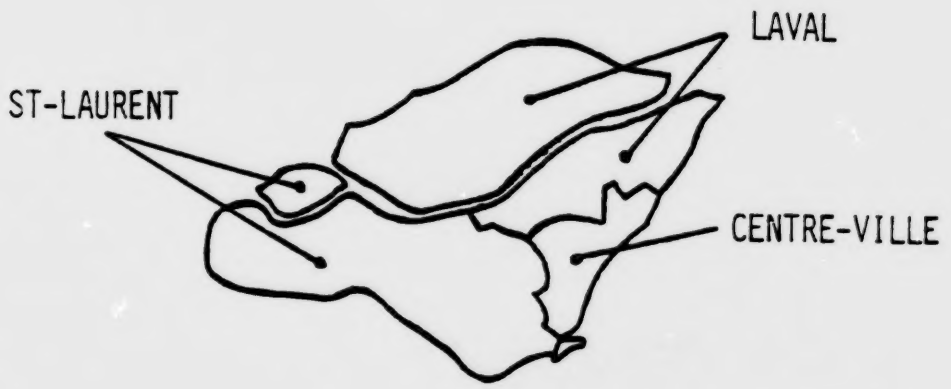


Figure 1.1 : Secteurs de la division postale de Montréal

Chaque secteur est subdivisé en zones, chacune d'elles est desservie par une seule et unique succursale postale. Chacune de ces zones est à son tour subdivisée en régions de tri et d'acheminement (communément appellée RTA, elles sont identifiées par les trois premières lettres du code postal). Par exemple à la figure 1.2, on retrouve les divisions et sous-divisions du secteur centre-ville de la division de Montréal. Ainsi, ce secteur comporte quinze zones de succursales (délimitées par des traits pleins); ces quinze zones sont au total sous-divisées en 31 RTA (délimitées par des traits pleins et pointillés). La succursale K couvre les RTA H1L-H1M-H1N, la succursale Delorimier couvre les RTA H2J-H2H, etc.

Chaque succursale possède sa flotte de véhicules et son groupe de chauffeurs. Toutefois, pour des raisons de capacité physique, la flotte de certaines succursales est localisée à un garage servant de port d'attache complémentaire. On parlera donc de port d'attache pour désigner le lieu affecté à un véhicule et à son chauffeur, un port d'attache pouvant être une succursale ou un garage.

1.1 Les tâches du chauffeur

Quatre services de base offerts par la Société des postes touchent le transport intra-urbain : la collecte des boîtes aux lettres, la poste prioritaire, le service de colis et les livraisons spéciales. De plus, un réseau de distribution à des armoires à relais s'ajoute en tant que soutien aux livraisons effectuées par les facteurs ainsi qu'un réseau de navettes entre les succursales et le centre de traitement. Le réseau de poste prioritaire étant de nature dédié à la division, nous ne le traiterons pas dans

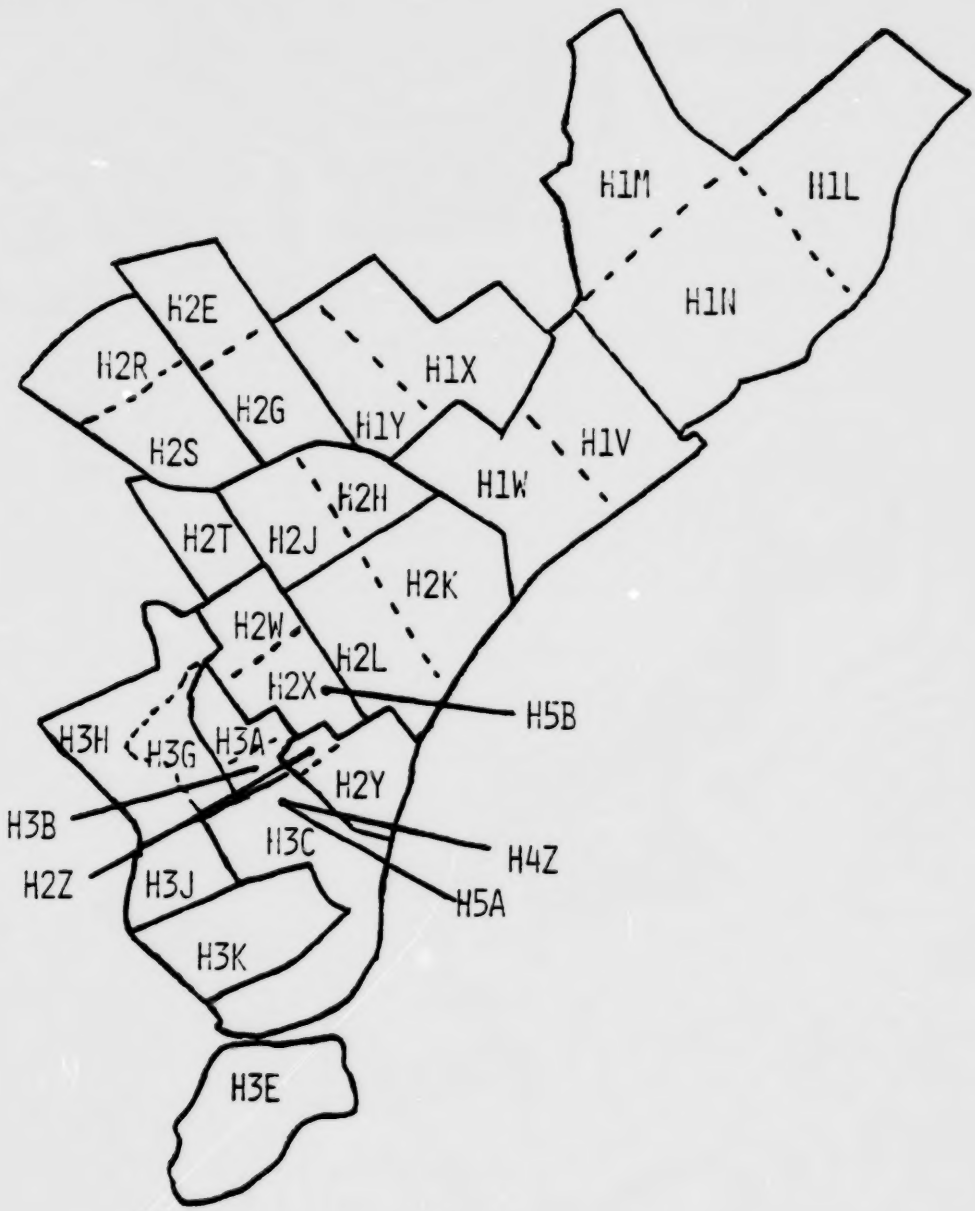


Figure 1.2 : Répartition des RTA et zones de succursales du secteur centre-ville

notre processus d'agencement d'un secteur. On peut donc diviser les tâches d'un secteur en deux groupes d'opérations : les tâches à points de demande fixes et les activités à points de demande variables.

Les tâches à points de demande fixes font l'objet d'un processus de confection de tournées ("routing") spécifiant de façon précise le cheminement des véhicules. Les tâches de ce type comprennent la collecte des boîtes aux lettres (levée), la livraison aux armoires à relais (relais), le ramassage de colis et les activités reliées à un réseau de navettes.

Les activités à points de demande variables couvrent les activités reliées à la livraison de colis et aux livraisons spéciales. Le volume de travail dû à ces activités fluctue d'une journée à l'autre; ainsi elles sont considérées globalement plutôt qu'en terme de tâches spécifiques.

Les deux groupes précédents représentent donc les fonctions de base du service de distribution par petits camions. Toutefois, ils ne couvrent pas toutes les activités puisqu'ils n'incluent pas certaines activités connexes inhérentes aux droits du chauffeur et à l'utilisation de son véhicule. On retrouve donc un troisième groupe d'activités, dites connexes. Il inclut les activités reliées à l'entretien et à la préparation du véhicule, aux pauses-café et aux repas et aux déplacements à vide sur le réseau routier.

1.1.1 Tâches à points de demande fixes

Comme on l'a vu plus tôt, on retrouve quatre types de tâches dans le groupe des tâches à points de demande fixes dont voici une brève définition :

Relais : distribution de courrier aux armoires à relais. Un chauffeur effectuant une telle tâche, transporte le courrier d'une succursale à différents points de service où les facteurs prendront le courrier à distribuer.

Levée : ramassage du contenu des boîtes aux lettres. Le courrier déposé par les usagers dans les boîtes est transporté soit à la succursale ou au centre de traitement.

Navette : transport du courrier entre deux succursales, ou entre la succursale et le centre de traitement et vice versa.

Ramassage de colis : ramassage de colis chez certains clients ayant un fort volume d'expédition et détenant des contrats avec la Société des postes.

Chaque tâche constitue une tournée devant être complétée par un chauffeur à l'intérieur d'un certain cadre-horaire. Un cadre-horaire est un intervalle de temps dans lequel la tâche doit être entreprise et terminée. Cette notion est complémentaire à la notion de fenêtre de temps utilisée souvent dans la littérature et désignant l'intervalle de temps dans lequel la tâche doit être entreprise. En effet, la borne inférieure du cadre-horaire correspond à la borne inférieure de la fenêtre de temps tandis que la borne supérieure de cette dernière est obtenue en soustrayant de la borne supérieure du cadre-horaire la durée de la tâche. Le processus d'agencement ne remet pas en question le cheminement des tâches de ce type, mais détermine dans le temps, le moment où elles seront exécutées.

Pour faire l'agencement des tâches à points de demande fixes, l'information suivante est requise :

- la durée de la tâche;
- le point d'origine de la tâche, i.e. le lieu physique où elle débute;
- le point de destination de la tâche, i.e. le lieu physique où elle se termine;
- le cadre-horaire de la tâche (habituellement assez restreint);
- le(s) port(s) d'attache du chauffeur pouvant être affecté à la tâche.

1.1.2 Activités à points de demande variables

Comme indiqué précédemment, on retrouve dans cette catégorie deux types d'activités :

livraison de colis : livraison de colis directement au destinataire.

livraison spéciale : livraison spéciale du courrier, i.e. des lettres, colis, etc..., aux destinataires.

Afin de résoudre le problème de définition des tâches à points de demande variables, les planificateurs estiment les demandes en se basant sur des moyennes. Ces estimations engendrent un temps total réservé à ces activités pour chaque zone de succursale. Il faut donc prévoir à l'horaire suffisamment de temps pour rencontrer cette demande qui pourra être découpée en morceaux de temps de longueur variable à l'intérieur de l'horaire. Pour éviter des morceaux de trop petite longueur où un chauffeur n'aurait pas vraiment le temps d'entreprendre ces activités, une borne inférieure est imposée sur leur longueur. Les morceaux deviennent alors des tâches avec un cadre-horaire très peu restrictif, chacun d'eux pouvant toutefois être entrecoupé d'un dîner ou d'une pause.

Pour insérer les activités à points de demande variables à l'intérieur d'une journée de travail, on a besoin de l'information suivante :

- la demande totale en temps pour l'activité;
- le cadre-horaire de l'activité (peu restreint);
- le port d'attache relié à l'activité.

1.1.3 Activités connexes

Les activités connexes du chauffeur sont les suivantes :

- préparation au départ : le chauffeur doit se rendre à son véhicule, effectuer certaines vérifications, le charger, etc.
- rapport à l'arrivée : le chauffeur doit remiser son véhicule à son part d'attache à la fin de sa journée.
- déplacement à vide : le chauffeur déplace son véhicule d'un lieu à l'autre du réseau routier pour passer d'une tâche à une autre.
- pause-café : temps libre laissé au chauffeur pour se reposer. La pause-café doit être accordée dans un intervalle de temps relatif à l'heure de début de la journée du chauffeur.
- repas : temps libre laissé au chauffeur pour son repas. Le repas doit être accordé dans un intervalle de temps relatif à l'heure de début de la journée du chauffeur. Il peut être de longueur variable, mais compris entre une longueur minimale et maximale.

1.2 Répartition des tâches et activités sur le territoire

Les activités du transport postal intra-urbain sont physiquement décentralisées. Ainsi, les succursales se partagent les tâches du secteur dont chacune ne peut être exécutée que par un chauffeur rattaché à certains ports d'attache prédéfinis. Par exemple, dans le tableau 1.1, on retrouve

le partage des responsabilités quant à l'exécution des tâches et activités du secteur centre-ville de la division de Montréal.

Tableau 1.1 : Responsabilités des tâches et activités, secteur centre-ville

relais	: zone de succursale
ramassage de colis	: zone de succursale
levée	: zone de levée (i.e. une ou plusieurs zones de succursales jumelées)
navette	: une ou plusieurs zones de succursales jumelées
colis	: zone de succursale
livraison spéciale	: zone de succursale

1.3 Les journées de travail des chauffeurs

On retrouve deux types de chauffeurs, soit les chauffeurs à temps plein et ceux à temps partiel. Dans chaque secteur, la proportion du nombre de chauffeurs à temps plein par rapport à ceux à temps partiel est spécifiée. Cette contrainte, issue du contexte opérationnel de la Société des postes, exprime le désir d'assurer un pourcentage minimal de chauffeurs à temps plein et un pourcentage maximal de chauffeurs à temps partiel.

Chaque journée de travail doit répondre à des caractéristiques bien précises. Ainsi, toute journée doit débuter par une tâche de type préparation au départ, la durée de celle-ci dépendant du port d'attache du chauffeur. L'heure de début de la journée correspond donc à l'heure de début de cette tâche. Selon son type, le chauffeur peut avoir droit ou non à un

repas et à des pauses-café. On doit donc réserver du temps dans la journée pour effectuer ces tâches connexes dont le cadre-horaire est relatif au début de la journée. Par exemple, pour une journée débutant à 8:00, si le le repas doit être pris de trois à cinq heures après le début de la journée, alors le cadre-horaire du repas sera de 11:00 à 13:00. Par ailleurs, chaque journée doit se terminer par un rapport à l'arrivée d'une durée qui dépend aussi du port d'attache du chauffeur. Ainsi l'heure de fin de la journée correspond à la fin de cette tâche.

De plus, on retrouve dans une journée des périodes de temps où le chauffeur n'est affecté à aucune tâche, tout en étant payé; on désigne ce temps par le terme temps en disponibilité (appellé communément "temps pour fonction non-cédulée (TFNC)" dans le jargon postal).

Finalement, un intervalle de temps est spécifié pour le temps payé à chaque type de chauffeur. Ainsi, la borne inférieure de l'intervalle représente le minimum garanti par l'employeur. Lorsque le temps payé au chauffeur excède cette borne inférieure, la partie en excès est considérée comme du temps supplémentaire. La borne supérieure de l'intervalle représente le temps payé maximum incluant le temps supplémentaire. Toutefois, le temps accordé au repas peut n'être comptabilisé qu'en partie dans le temps payé au chauffeur; ainsi en ajoutant cela au fait que le repas peut être de longueur variable, il est possible d'obtenir différentes amplitudes de journée (heure de fin moins heure de début de journée) pour un type donné.

1.3.1 Évaluation du coût d'une journée de travail

Le coût d'une journée de travail d'un chauffeur est composé de trois éléments. Le premier est un coût fixe relié au chauffeur et comporte

l'évaluation journalière du coût des avantages sociaux, bénéfices marginaux et autres coûts indirects.

Le second est un coût relié à l'utilisation journalière du véhicule, mais n'incluant pas les frais d'acquisition de celui-ci. Ce coût est évalué en multipliant par un coût horaire le temps total de déplacement, ce dernier incluant les temps de déplacement à vide, les durées des tâches à points de demande fixes et à points de demande variables.

Finalement, le troisième coût est relié au salaire du chauffeur. Pour évaluer celui-ci, on multiplie le minimum garanti par un taux horaire donné. Si on excède ce minimum, la partie en excès est considérée comme du temps supplémentaire et est rémunérée selon un taux horaire spécifique. Par exemple, si l'intervalle associé à la longueur de la journée d'un chauffeur à temps plein est [480 min, 600 min], alors l'employeur devra lui garantir un minimum de 480 minutes de travail rémunéré à un taux horaire correspondant à celui en temps régulier. Par contre, si le chauffeur travaille plus de 480 minutes et ce jusqu'à concurrence de 600 minutes, les 480 premières minutes lui sont payées au taux horaire du temps régulier tandis que les suivantes le sont à un second taux horaire correspondant à celui en temps supplémentaire.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION DU PROBLÈME ET APPROCHE GÉNÉRALE DE RÉSOLUTION

Voyons donc de façon générale comment formuler le problème en spécifiant l'objectif visé et les différentes contraintes du problème.

2.1 Objectif et contraintes

Étant donné que nous avons différents types de chauffeurs, ainsi que différents coûts impliqués, notre objectif sera de minimiser la somme des coûts des journées de travail.

Les contraintes

a) Chaque tâche à points de demande fixes doit être exécutée une fois et une seule, et ce à l'intérieur d'un cadre-horaire propre à chaque tâche. La tâche doit être affectée à un chauffeur provenant du ou des port(s) d'attache pouvant la desservir.

b) À chaque port d'attache, on doit pouvoir compléter les activités à points de demande variables, i.e. prévoir un temps total de disponibilité permettant le découpage de la demande variable en tâches de durée minimale satisfaisant le cadre-horaire de cette demande.

c) Le nombre de journées à temps plein et celui des journées à temps partiel doivent satisfaire une proportion spécifique à l'intérieur de l'ensemble du secteur. Cette contrainte vise à assurer un pourcentage minimal de journées à temps plein et un pourcentage maximal de journées à temps partiel.

d) Tout chauffeur doit débuter et terminer sa journée à son port d'attache. La journée de travail d'un chauffeur doit inclure du temps pour l'entretien et la préparation du véhicule, du temps pour les pauses-café et les repas et satisfaire l'intervalle de temps sur la longueur de la journée associé à son type, i.e. le minimum garanti et le maximum permis.

2.2 Modélisation : revue de la littérature

Dans la littérature, on retrouve plusieurs types de modèle pour le problème d'élaboration des horaires du personnel dans le domaine des transports : les modèles de programmation mathématique, ceux de couplage et de recouvrement. Nous ne discuterons que des modèles de recouvrement, le lecteur intéressé par les autres modèles peut consulter la revue de la littérature qu'on retrouve dans Bodin et al. [1].

Le modèle de recouvrement s'énonce comme suit :

$$\text{Min} \quad \sum_{j \in \Omega} c_j \, x_j$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j \in \Omega} a_{ij} \, x_j \geq 1 \qquad i=1,\ldots,n \qquad (1)$$

$$x_j = 0,1 \qquad \forall j \in \Omega \qquad (2)$$

où Ω : l'ensemble des journées de travail.

c_j : coût de la $j^{\text{ième}}$ journée de travail.

x_j : égale à 1 si la $j^{\text{ième}}$ journée est choisi, 0 sinon.

a_{ij} : élément de la matrice décrivant les tâches d'une journée. Il est égal à un si la journée j contient la tâche i, sinon il est égal à zéro.

n : le nombre de tâches à recouvrir.

Dans la plupart des problèmes d'élaboration d'horaires, on retrouve des contraintes additionnelles que l'on peut modéliser par des contraintes linéaires de la forme

$$\sum_{j \in \Omega} d_{kj} x_j > D_k \quad \text{où} \quad k=1,\ldots,K$$

où K est le nombre de contraintes additionnelles et d_{kj} le coefficient de la $j^{ième}$ journée de travail dans la $k^{ième}$ contrainte additionnelle. On parlera alors de modèles de recouvrement avec contraintes supplémentaires.

Cette formulation a été utilisée dans plusieurs domaines. Dumas [8] propose ce type de modèle pour le problème d'élaboration de tournées et d'horaires pour une flotte mixte de véhicules devant effectuer un ensemble de demandes de transport. Desrosiers et al. [4] l'utilise pour minimiser le nombre d'autobus scolaires et leur kilométrage total. En transport aérien, Lavoie [11] utilise un modèle de recouvrement pour élaborer des horaires d'équipage. En transport des handicapés, Desrosiers et al. [7] modélise de la même façon l'élaboration des journées de travail des chauffeurs. Et tout récemment, Desrochers [3] utilise cette formulation pour la fabrication d'horaire de travail des conducteurs d'autobus urbains. De tous ces champs d'application, le contexte de ce dernier problème est celui qui se rapproche le plus du contexte de notre problème. En effet, on retrouve une similarité au niveau des caractéristiques des journées (minimum garanti et maximum permis sur le temps payé, pauses, etc.). Toutefois, il existe certaines différences : le cadre-horaire sur les pauses, le cadre-horaire des tâches plus large que leur durée, et l'intégration des activités à points de demande variables.

2.3 Modélisation du problème d'horaire dans le contexte postal

Nous utiliserons un modèle de recouvrement pour formuler notre problème d'élaboration d'horaire. Cette formulation permet une optimisation globale du problème et a l'avantage de séparer les contraintes globales de celles caractérisant la structure des journées.

Introduisons la notation suivante :

Ω : l'ensemble des journées de travail des chauffeurs du secteur satisfaisant les contraintes définies précédemment en a) et d).

j : la $j^{ième}$ journée de travail appartenant à l'ensemble Ω.

y_j : 1 si la journée de travail j est utilisée, 0 sinon.

c_j : coût de la journée j.

δ_{ij} : 1 si la journée j contient la tâche i, 0 sinon.

γ_{pj} : temps disponible dans la journée j pour les activités à points de demande variables au port d'attache p (ce temps doit satisfaire le cadre-horaire associé à ces activités).

D_p : la demande total de temps pour les activités à points de demande variables au port d'attache p.

F : l'ensemble des tâches à points de demande fixes à effectuer dans le secteur.

P : l'ensemble des ports d'attache du secteur.

Ω^{PL} : l'ensemble des journées à temps plein du secteur.

Ω^{PA} : l'ensemble des journées à temps partiel du secteur.

α : proportion minimale de journées à temps plein dans le secteur.

Le problème d'élaboration d'horaire pour le transport postal intra-urbain peut donc s'écrire sous la forme du modèle mathématique suivant :

Modèle 1

$$\text{Min} \quad \sum_{j\in\Omega} c_j y_j$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j\in\Omega} \delta_{ij} y_j = 1 \quad \forall\, i\in F \qquad (1)$$

$$\sum_{j\in\Omega} \gamma_{pj} y_j \geq D_p \quad \forall\, p\in P \qquad (2)$$

$$(1-\alpha) \sum_{j\in\Omega^{PL}} y_j - \alpha \sum_{j\in\Omega^{PA}} y_j \geq 0 \qquad (3)$$

$$y_j = 0 \text{ ou } 1 \quad \forall\, j\in\Omega \qquad (4)$$

Il constitue un modèle linéaire en nombres entiers formulé comme un problème de partitionnement avec contraintes supplémentaires.

Les contraintes définies en (1) assurent que chaque tâche à points de demande fixes sera exécutée une seule fois; tandis que les contraintes définies en (2) assurent que l'on peut intégrer les activités à points de demande variables de chaque port d'attache. Les contraintes définies en (3) assurent la présence d'une proportion minimale de chauffeurs à temps plein et d'une proportion maximale de chauffeurs à temps partiel. En effet, si l'on désire une proportion minimale de α pour les chauffeurs à temps plein, ceci implique que

$$\frac{\sum_{j\in\Omega^{PL}} y_j}{\sum_{j\in\Omega} y_j} \geq \alpha \iff \frac{\sum_{j\in\Omega^{PL}} y_j}{\sum_{j\in\Omega^{PL}} y_j + \sum_{j\in\Omega^{PA}} y_j} \geq \alpha$$

$$\Longleftrightarrow \quad \sum_{j\in\Omega^{PL}} y_j > \alpha \sum_{j\in\Omega^{PL}} y_j + \alpha \sum_{j\in\Omega^{PA}} y_j$$

$$\Longleftrightarrow (1-\alpha) \sum_{j\in\Omega^{PL}} y_j - \alpha \sum_{j\in\Omega^{PA}} y_j > 0$$

Les contraintes définies en (4) sont dites des contraintes d'intégrité et assurent que chaque journée est choisie ou ne l'est pas. Toutes les contraintes relatives aux caractéristiques des journées sont implicitement incluses dans la définition de l'ensemble Ω. Le nombre total de contraintes est égal à la somme des cardinalités des ensembles F et P augmenté de un. Le modèle comporte autant de variables qu'il y a de journées possibles.

Afin de faciliter la résolution du modèle, nous allons remplacer les égalités des contraintes définies en (1) par des inégalités. On obtient alors le modèle de recouvrement avec contraintes supplémentaires suivant :

Modèle 2

$$\text{Min} \quad \sum_{j\in\Omega} c_j y_j$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j\in\Omega} \delta_{ij} y_j \geq 1 \qquad \forall i\in F \qquad (1a)$$

$$\sum_{j\in\Omega} \gamma_{pj} y_j \geq D_p \qquad \forall p\in P \qquad (2)$$

$$(1-\alpha) \sum_{j\in\Omega^{PL}} y_j - \alpha \sum_{j\in\Omega^{PA}} y_j > 0 \qquad (3)$$

$$y_j = 0 \text{ ou } 1 \qquad \forall j\in\Omega \qquad (4)$$

La solution optimale du modèle 2 sera aussi optimale pour le modèle 1. En effet, un coût est associé à chaque tâche (déplacement du véhicule sur le réseau routier) et il est toujours possible d'enlever, d'une journée de travail, une tâche recouverte plus d'une fois.

2.4 Résolution des modèles de recouvrement : revue de la littérature

Les différentes approches de résolution du modèle de recouvrement avec contraintes supplémentaires se divisent en deux catégories : les approches heuristiques et les approches exactes.

L'idée des approches heuristiques, illustrée à la figure 2.1, consiste à générer par une technique quelconque un sous-ensemble de journées intéressantes et de résoudre sur celui-ci, un modèle de recouvrement où les contraintes d'intégralité sont relaxées. Si nécessaire, une méthode de branchement est ensuite appliquée pour obtenir une solution entière. Une telle approche traite en fait une restriction du problème original obtenu en fixant à zéro la valeur des variables associées aux journées ne faisant pas partie du sous-ensemble généré. Ainsi ce type d'approche ne permet pas de garantir l'optimalité de la solution car on résout le modèle sur un sous-ensemble de variables. En effet, il demeure possible qu'une journée jugée non-pertinente s'avère en fait fort intéressante. Ce risque augmente avec la taille du problème; ainsi, plus le nombre de tâches sera grand, plus il y aura de journées possibles. La capacité-mémoire de l'ordinateur limitera alors le nombre de variables intéressantes que l'on peut considérer, et par conséquent, pourra diminuer la qualité de la solution.

Les approches exactes incorporent une technique de génération de colonnes (journées) pour générer les journées qui deviennent intéressantes lors de la résolution des restrictions du problème original. Une telle approche est illustré à la figure 2.2. En effet, celle-ci consiste à résoudre de façon répétitive un problème-maître et un sous-problème générateur de colonnes (i.e. des variables ou journées) jusqu'à ce que l'optimalité

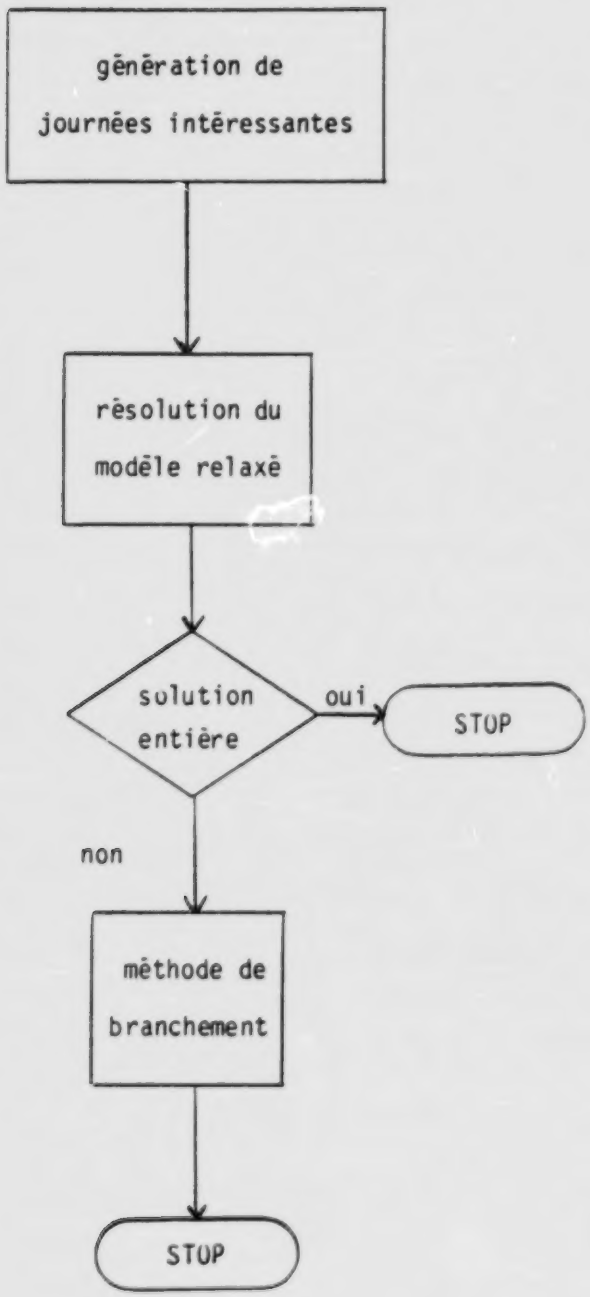


Figure 2.1 : Algorithme heuristique pour le modèle de recouvrement avec contraintes supplémentaires

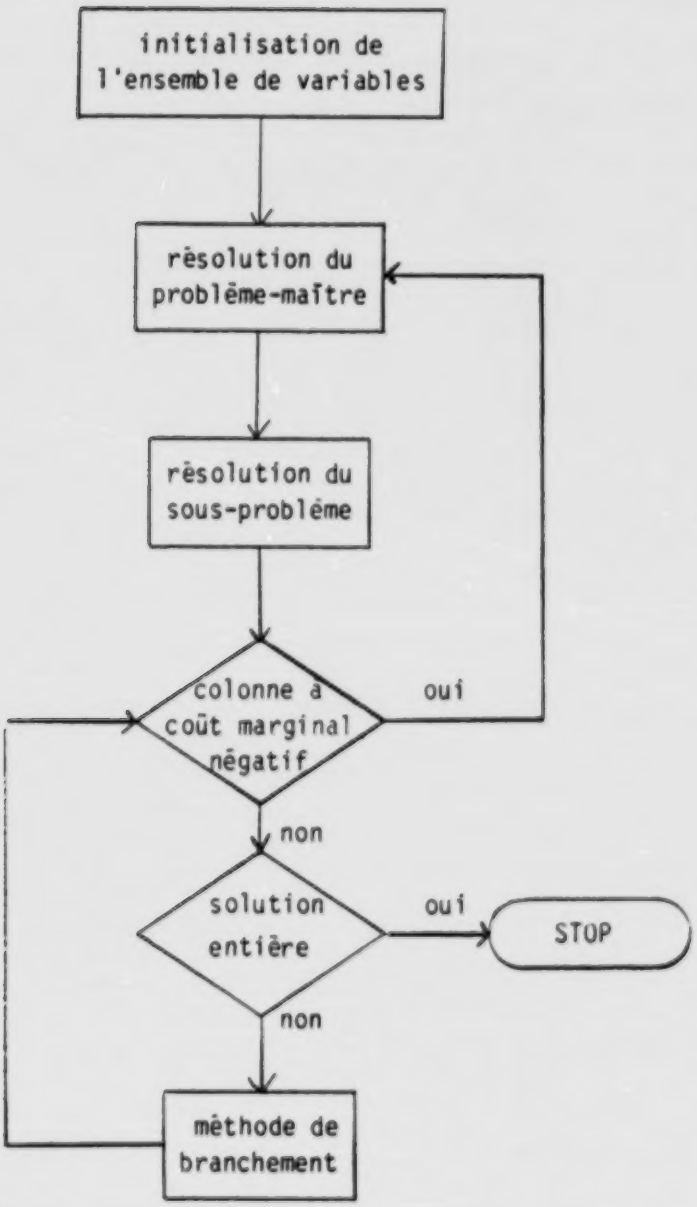


Figure 2.2 : Algorithme de génération de colonnes pour le modèle de recouvrement avec contraintes supplémentaires

l'optimalité soit atteinte. Ainsi dans un premier temps, les contraintes d'intégralité sont relaxées et on résout le problème de recouvrement avec contraintes supplémentaires (i.e. le problème-maître). Ensuite, on utilise l'information donnée par le dual du problème-maître pour générer de nouvelles variables à coût relatif négatif. On ajoute ces variables à l'ensemble de journées et on recommence la résolution du problème-maître. On répète ce processus jusqu'à ce que le sous-problème ne produise plus de variables à coût relatif négatif. Si nécessaire, l'intégralité de la solution est ensuite obtenue en appliquant une technique de branchement et en générant au besoin de nouvelles journées.

Le sous-problème est souvent un problème pour lequel il faut développer un algorithme spécifique. Ainsi, en transport scolaire [4] et en transport des personnes handicapées [7], Desrosiers et al. utilise un algorithme de plus court chemin avec contraintes d'horaires [6]. En transport aérien, Lavoie [11] utilise un algorithme de plus court chemin sur une série de réseaux où les coûts non-linéaires associés aux horaires des membres d'équipage ont des valeurs approchées. En transport des marchandises, Dumas [8] a développé un algorithme de plus court chemin avec cueillette et livraison sous des contraintes d'horaires et de capacité. Dans sa thèse de doctorat, Desrochers [3] a récemment développé un algorithme de programmation dynamique multidimensionnelle pour résoudre le sous-problème générateur des journées soumises à des contraintes similaires à celles de notre problème.

L'utilisation d'une méthode de génération de colonnes permet d'obtenir la solution optimale de problèmes modélisés sous la forme de problèmes de recouvrement. Cette recherche de l'optimalité peut toutefois demander dans certain cas des temps d'exécution fort élevés, (Desrochers

[3] rapporte que pour résoudre un problème de 235 tâches, il a fallu plus de 15 000 secondes de CPU sur un ordinateur Cyber 835). L'utilisation de l'une ou l'autre des approches dépendra donc du type de compromis que l'on veut faire entre le temps d'exécution et la qualité de la solution.

2.5 Méthode de résolution proposée

Pour résoudre notre modèle, nous proposons une méthode heuristique se décomposant en trois phases : génération de journées intéressantes, sélection de journées de travail, découpage et insertion des activités à points de demande variables. Voyons donc les principes généraux de notre méthode illustrés à la figure 2.3 et décrits en détail aux chapitres 3 et 4.

La première phase consiste à construire un ensemble Ω' contenant des journées ayant un temps de disponibilité réduit. Pour ce faire, on a adapté une heuristique utilisée en transport scolaire [5] pour générer des circuits d'autobus. Ainsi, dans un premier temps, les tâches à points de demande fixes sont chaînées en résolvant une suite de problèmes de transport. Ce chaînage est fait de façon à permettre l'insertion d'activités connexes pour en faire des journées de travail des chauffeurs. Le temps de disponibilité présent dans chacune d'elles pourra être utilisé lors du découpage des activités à points de demande variables. Finalement, on génère des journées "vides" (i.e. des journées ne contenant aucune tâche à points de demande fixes) pouvant être utilisées lorsque le temps de disponibilité contenu dans les journées "non-vides" ne permet pas de couvrir l'ensemble des activités à points de demande variables.

La deuxième phase consiste à résoudre le modèle 2 où l'ensemble Ω

est remplacé par l'ensemble Ω'. Pour ce faire, on relaxe dans un premier temps les contraintes d'intégralité et on résout le modèle relaxé avec l'algorithme du simplexe. L'intégralité de la solution est obtenue en utilisant une technique de branchement. La résolution du modèle 2 sur le sous-ensemble Ω' ne permet toutefois pas de garantir que chaque tâche à points de demande fixes est affectée à un seul chauffeur. Par conséquent, lorsque certaines tâches sous la responsabilité d'un port d'attache donné sont recouvertes par plusieurs journées sélectionnées, on génère un nouvel ensemble de journées pour ce port d'attache après avoir retiré de l'ensemble F, les tâches recouvertes par plus d'une journée de travail (tâches saturées). Le nouvel ensemble de journées produit est alors ajouté à celles sélectionnées lors de la résolution du dernier problème restreint pour constituer un nouvel ensemble Ω'. On résout le nouveau problème restreint pour obtenir une nouvelle solution entière dont la valeur et le nombre de tâches saturées ne peuvent qu'être inférieurs à la solution précédente. En effet, l'élimination des tâches saturées découle du fait qu'un coût est associé à l'exécution de chaque tâche. Au besoin, le processus est répété jusqu'à ce que chaque tâche à points de demande fixes soit affectée à un seul chauffeur.

La dernière phase consiste à découper et insérer les activités à points de demande variables dans les journées sélectionnées. Pour ce faire, on découpe ces activités en tâches respectant la contrainte de longueur minimale et satisfaisant le cadre-horaire de la demande. Le temps de disponibilité des journées de chauffeur est utilisé pour effectuer les tâches nouvellement créées.

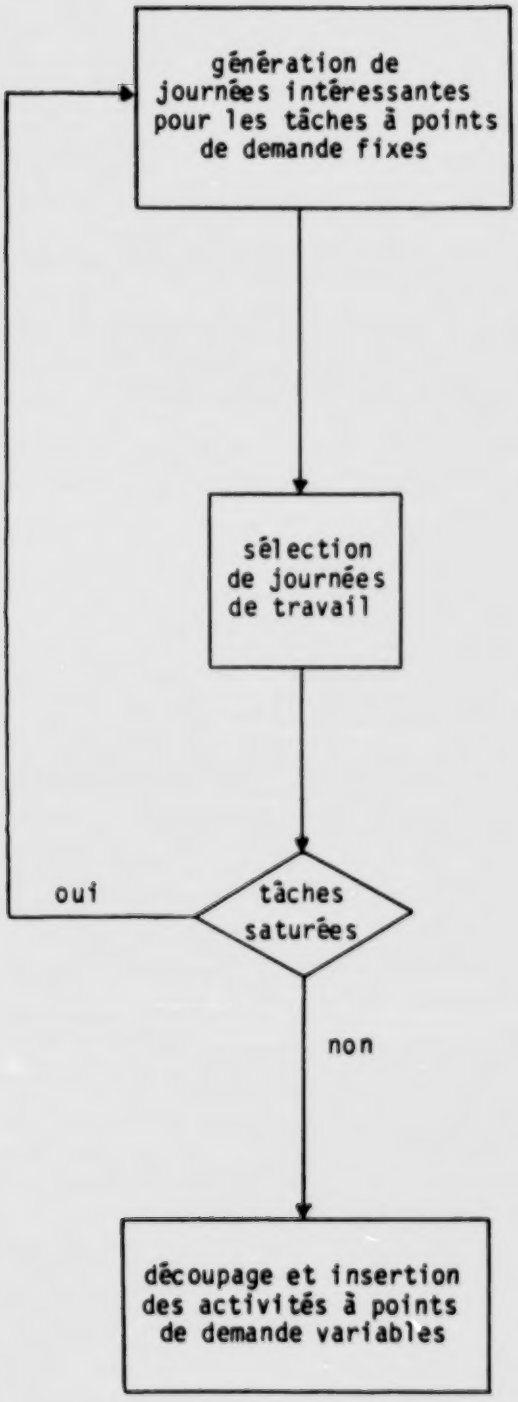


Figure 2.3 : Phases de la méthode de résolution proposée

CHAPITRE 3

PHASE DE GÉNÉRATION DE JOURNÉES DE TRAVAIL

La phase de génération de journées de travail consiste en une série d'appels à un générateur de journées pour lequel sont spécifiées les caractéristiques des journées de travail à engendrer :

i) port d'attache;

ii) type de chauffeur;

iii) heure la plus hative pour débuter une tâche à points de demande fixes (heure de coupe).

Ainsi, en fixant le port d'attache, on définit implicitement :

- un temps de préparation au départ;
- un temps de rapport à l'arrivée;
- un lieu physique où doit débuter et se terminer la journée de travail du chauffeur;
- un ensemble de tâches à points de demande fixes et d'activités à points de demande variables à être effectuées.

Le second paramètre, le type de chauffeur, définit de façon implicite :

- les pauses-café et les dîners, i.e. leur durée minimale et maximale, leur durée payée, leur cadre-horaire relatif;
- le coût fixe associé au type de chauffeur;
- le taux horaire payé en temps régulier et associé au minimum garanti;
- le taux horaire payé en temps supplémentaire, i.e. associé au temps excédant le minimum garanti;
- l'intervalle de temps pour le temps payé des journées, par exemple : [480 min, 600 min].

Finalement, le troisième paramètre sert à définir le sous- ensemble de tâches du port d'attache à chaîner. Il est constitué d'une heure indiquant d'inclure dans le sous-ensemble toute tâche à points de demande fixes du port d'attache dont la borne inférieure de son cadre-horaire est supérieure ou égale à cette heure. Par exemple, si l'heure de coupe est égale à 8:30, alors on inclut dans l'ensemble toute tâche pouvant débuter au plus tôt à 8:30. Ce paramètre permet de produire une grande variété de journées en le fixant à différentes valeurs, soit 8:30, 13:00, 17:00, etc.

La phase de génération consistera donc à réaliser le processus itératif suivant :

pour chaque port d'attache faire
    pour chaque type de chauffeur faire
        pour chaque heure de coupe faire
            - générer des journées de travail ayant pour temps payé le minimum garanti;
            - générer des journées de travail ayant pour temps payé le maximum permis.

Il est à noter que le deuxième type où on admet que le temps payé est égal au maximum permis s'avère nécessaire pour considérer les activités à points de demande variables.

3.1 Le générateur

Le générateur se divise en deux processus : le chaînage des tâches à points de demande fixes et la mise à jour des chaînes produites par le générateur.

Le processus de chaînage repose sur la notion de précédence entre deux tâches, telle qu'introduite par Desrosiers [5] dans le cadre de l'agencement de parcours d'autobus scolaire. Ainsi, une tâche A peut être prédecesseur d'une tâche B, s'il est possible en tenant compte du déplacement entre le point de destination de A et le point d'origine de B, de réaliser la tâche A avant la tâche B à l'intérieur de leur cadre-horaire respectif. Nous pouvons représenter cette notion par un graphe de précédence G(N,A).

Ainsi dénotons :

d_i : la durée de la tâche i.

$[a_i - b_i]$: le cadre-horaire de la tâche i.

t_{ij} : le temps de déplacement à vide entre les tâches i et j.

Le graphe de précédence est alors construit comme suit :

i) pour chaque tâche i, on crée un noeud $i \in N$. Au port d'attache, on associe deux noeuds s et t;

ii) un arc (i,j), $i \neq j$, existe si la tâche i peut précéder la tâche j, i.e. $a_i + d_i + t_{ij} < b_j - d_j$;

iii) pour chaque tâche i, il existe deux arcs entre le port d'attache et la tâche, soit les arcs (s,i) et (i,t).

La figure 3.1 illustre un tel graphe de précédence. Dans le contexte postal, ce graphe peut contenir des cycles, puisque le cadre-horaire est dans certains cas assez large pour permettre une relation de précédence réciproque entre deux tâches (exemple tâches 2 et 3). Ce graphe de précédence est utilisé pour définir une suite de problèmes de réseau établissant le chaînage des tâches.

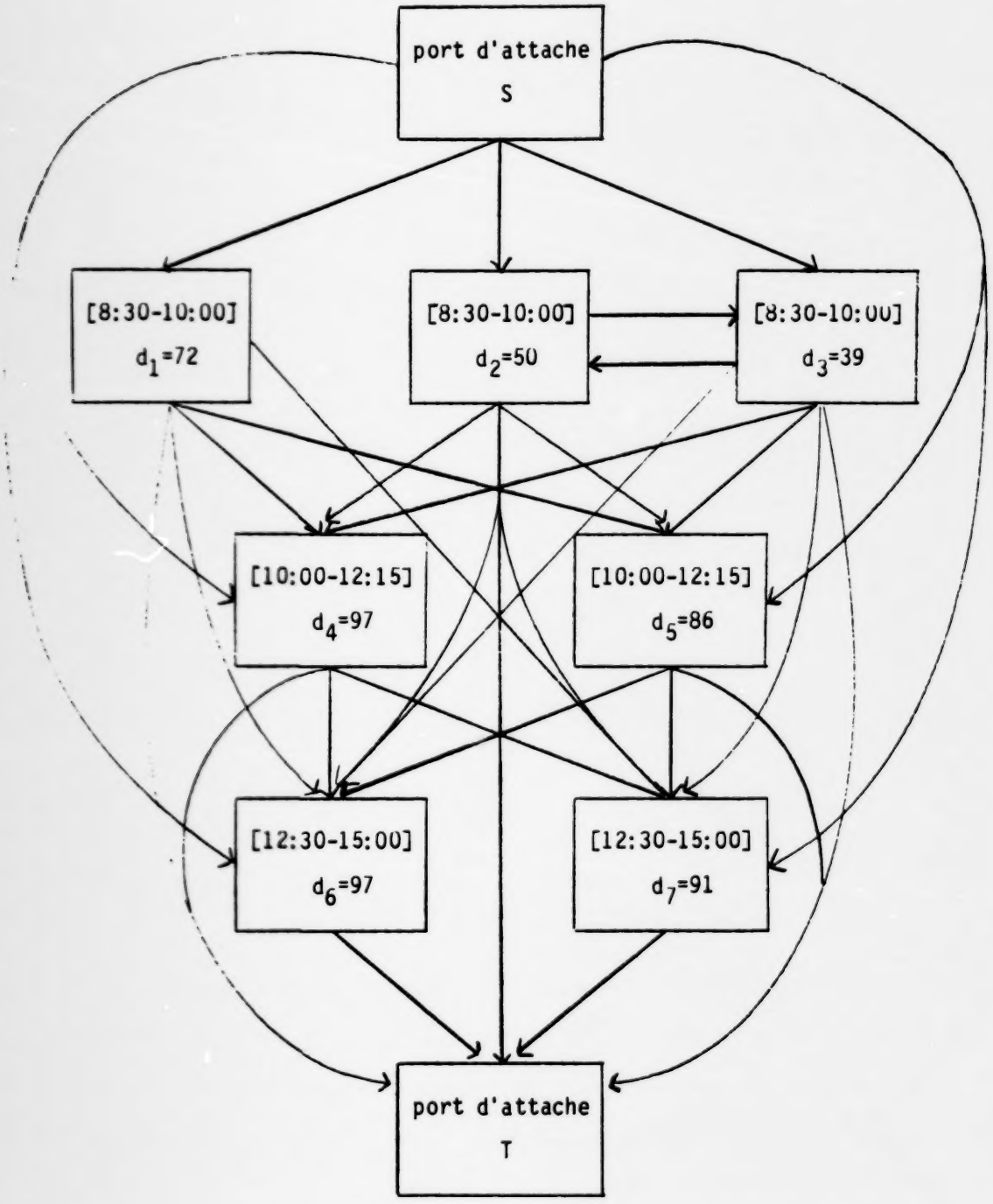


Figure 3.1 : Graphe de précédence

3.1.1 Procédure de chaînage de tâches

Voyons donc chacune des étapes composant le processus de chaînage. Soit :

F : l'ensemble des tâches à points de demande fixes.

F_p : l'ensemble des tâches à points de demande fixes rattachées au port d'attache p considéré, où $F_p \subset F$.

Étape 1 : Création de journées de travail initiales

i) soit T où $T \subseteq F_p$, un ensemble de tâches qui n'ont pas de prédécesseurs. (Dans le cas où T est vide, i.e. que chaque tâche est incluse dans un cycle du graphe de précédence, on insère dans T la tâche de durée minimum afin de libérer le plus tôt possible le chauffeur.)

ii) à chaque tâche $i \varepsilon T$, associer une nouvelle journée k.

Soit,

DB_k : l'heure de début de la journée de travail k.

o_i : le point d'origine de la tâche i.

PRD_p : le temps de préparation au départ au port d'attache p.

alors $DB_k = a_i - t_{po_i} - PRD_p$.

On note que ce choix d'heure de début de journée n'est fait que dans le but de libérer le plus tôt possible le chauffeur. Ce choix est important car tous les cadre-horaires des pauses-café et des repas en dépendent ainsi que l'heure de fin de journée. Évidemment, il pourrait devenir intéressant de fixer le début de la journée à une heure plus tardive pour incorporer plus facilement certaines tâches vers la fin de la journée. Il s'avère toutefois impossible de le

savoir à ce stade-ci du processus, car on n'a uniquement de l'information sur le passé de la chaîne.

iii) $F_p := F_p/T$.

Étape 2 : Création des noeuds du problème de transport

i) pour chaque tâche $i \in T$, créer un noeud source.

ii) soit AT où $AT \subseteq F_p$, un ensemble de tâches qui n'ont pas de prédécesseurs. (Dans le cas où AT est vide, on insère dans AT la tâche de durée minimum.)

iii) pour chaque tâche $j \in AT$, créer un noeud puits.

iv) créer une supersource et un superpuits.

Étape 3 : Définition de l'offre et de la demande des noeuds

i) une offre d'une unité de flot à chacun des noeuds associés aux tâches de l'ensemble T.

ii) une demande d'une unité de flot à chacun des noeuds associés aux tâches de l'ensemble AT.

iii) une demande de $|T|$ unités de flot au superpuits.

iv) une offre de $|AT|$ unités de flot à la supersource.

Étape 4 : Détermination des arcs, de leur coût et leur capacité

i) entre la supersource et chaque tâche $j \in AT$, créer un arc de capacité 1 et ayant un coût $M >> 0$.

ii) entre chaque tâche $i \in T$ et le superpuits, créer un arc de capacité 1 et de coût nul.

iii) entre la supersource et le superpuits, mettre un arc de capacité infini et de coût nul.

iv) entre chaque paire de tâches $i \in T$ et $j \in AT$ il existe un arc si :

- l'exécution de la tâche j après la tâche i n'entraîne pas un temps payé pour la journée de travail excédant la borne supérieure permise; évidemment lors de cette vérification on tient compte de la flexibilité au niveau de la longueur du dîner qui peut ne contribuer que partiellement au temps payé total;
- il est possible d'exécuter la tâche j après la tâche i en respectant le cadre-horaire de la tâche j;
- l'exécution de la tâche j après la tâche i permet d'insérer toutes les pauses requises.

Cet arc a une capacité de 1 et un coût c_a où $c_a = MAX(t_{ij}, h_j - h_i)$; h_i étant l'heure où la tâche i est terminé et h_j, l'heure la plus hâtive où peut débuter la tâche j tout en respectant son cadre-horaire et les pauses à insérer.

La figure 3.2 illustre un tel problème de transport à résoudre. Les ensembles T et AT contiennent respectivement les noeuds 1, 2, 3 et 4, 5. Pour chaque arc, on indique leur coût et leur capacité respectif entre parenthèses. Pour chaque noeud, on indique l'offre (+) et la demande (-).

Étape 5 : Résolution du problème de transport et interprétation des résultats

i) résoudre le problème de transport défini aux étapes 2, 3 et 4 à l'aide du logiciel RNET [10].

ii) on interprète les résultats de la façon suivante. Supposons que f(a,b), le flot entre les noeuds a et b est égale à un. Si $a \in T$ et $b \in AT$, alors la tâche b est exécutée à la suite de la tâche a dans

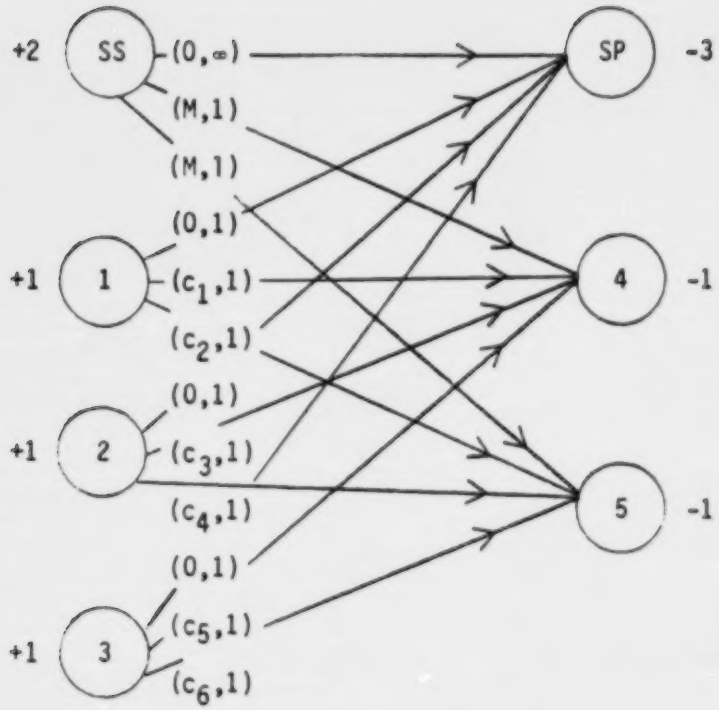


Figure 3.2 : Problème de transport associé au chaînage des tâches

une journée de travail. Le coût de l'arc entre a et b représente l'écart à laisser entre les tâches pour inclure les pauses et satisfaire le cadre-horaire de la tâche b. Celle-ci débute à l'heure obtenue en additionnant à l'heure de fin de la tâche a le coût de l'arc entre a et b.

Si a=SS et bεAT, alors la tâche b est utilisée pour initialiser une nouvelle journée de travail. L'exécution de la tâche b débute à la borne inférieure de son cadre-horaire. L'heure de début de journée est déterminée comme à l'étape iii).

Si aεT et b=SP, alors la journée de travail contenant la tâche a demeure inchangée.

Le flot sur l'arc (SS, SP) ne fait qu'indiquer le nombre de tâches qui ont été chaînées ensemble.

Étape 6 : Modification des ensembles F_p et T

i) $F_p := F_p/T$.

ii) mettre dans l'ensemble T, les tâches de l'ensemble AT et celles qui sont l'origine d'arc traversé par un flot de 1 et aboutissant à SP.

iii) si F_p est vide alors FIN DU CHAINAGE

sinon aller à l'étape 2.

Le processus de chaînage repose donc sur les cadres-horaires des tâches à agencer. Ces cadres-horaires étant souvent des approximations, nous avons défini sur ceux-ci un paramètre de flexibilité. Ce paramètre définit un nombre de minutes à ajouter à la borne supérieure du cadre-horaire de chaque tâche à points de demande fixes. Ainsi, il sera possible de permettre certaines possibilités de chaînage qu'y auparavant n'était pas permise parce que l'on dépassait de quelques minutes la borne supérieure du cadre-horaire.

3.1.2 Mise à jour des chaînes

On doit donc insérer à l'intérieur de chaque chaîne, des activités connexes afin d'en faire des journées de travail de chauffeurs. Voyons donc à quels moments sont insérés les différentes activités connexes et quelles en seront la durée.

Préparation au départ

Cette activité est insérée au début de la journée, i.e. avant la première tâche spécifique déterminée lors du chaînage. Sa durée dépend du port d'attache associé à la chaîne.

Rapport a l'arrivée

Sa durée dépend du port d'attache. Cette tâche étant la dernière de la journée, l'heure de fin de la journée correspond à l'heure de fin de cette tâche. Avant d'aller plus loin, rappellons tout d'abord que lors de la fabrication des chaînes, nous n'avons considéré que les valeurs minimum garanti et maximum permis pour le temps payé d'une journée. Ainsi, pour les journées de travail générées ayant un temps payé égal au maximum permis, il est possible que le temps supplémentaire en disponibilité soit en partie à l'extérieur du cadre-horaire des activités à points de demande variables du port d'attache. Par conséquent, il est nécessaire de distinguer deux cas, le premier est celui où le temps payé de la journée est égal au minimum garanti du type de chauffeur, et le second est celui où le temps payé est égal au maximum permis du type de chauffeur.

Cas 1 : temps payé de la journée = minimum garanti du type de chauffeur.

Ainsi,

heure de début du rapport à l'arrivée = heure de début de la journée
+ temps payé de la journeé
+ temps non-payé sur le repas
- temps de rapport à l'arrivée.

Cas 2 : temps payé de la journée = maximum permis du type de chauffeur.

Ainsi,

heure de début du rapport à l'arrivée = heure de début de la journée
+ temps payé de la journée
+ temps non-payé de la journée
- temps de rapport à l'arrivée
- temps inutilisable en temps supplémentaire.

Pause-café

Elle débute dans une période de disponibilité respectant son cadre-horaire relatif, sa durée a été donnée en paramètre.

Repas

Il débute dans une période de disponibilité respectant son cadre-horaire relatif. Sa durée est obtenue en additionnant le temps payé et non-payé du repas; rappellons que ce dernier a été calculé lors du processus de chaînage.

Retour au garage

Un déplacement entre le point de destination de la dernière tâche et le port d'attache est inséré à l'horaire juste avant le rapport à l'arrivée.

3.2 Génération de journées de travail "vides"

Une journée de travail sans aucune tâche à points de demande fixes (journée de travail "vide") peut s'avérer intéressante dans une situation où la demande variable est très forte. Par conséquent, il est pertinent d'inclure dans l'ensemble Ω', un certain nombre de journées de travail "vides".

On génère des journées de travail "vides" pour chaque combinaison (type de journée, minimum garanti) et (type de journée, maximum permis). Le nombre de journées de travail à générer pour chaque combinaison est déterminé en divisant la demande variable totale par le temps maximal de disponibilité pouvant être présent dans une journée d'un type donné. Cette valeur est obtenue en soustrayant au temps payé, les temps de rapport à

l'arrivée et de préparation au départ ainsi que la somme des longueurs minimales des pauses-café et des repas. Ainsi, ces journées de travail "vides" contiendront uniquement des activités connexes. La préparation au départ est insérée de façon à ce qu'elle soit complétée au début du cadre-horaire de la demande variable. On ajoute à l'heure de début de la journée (i.e. le début de la préparation au départ) le temps payé et le temps non-payé sur la longueur minimale du repas (s'il y a lieu) pour obtenir l'heure de fin du rapport à l'arrivée. Les pauses-café et les repas sont insérés au milieu de leur cadre-horaire relatif respectif.

3.3 Tâches à points de demande fixes sous la responsabilité de plusieurs ports d'attache

Comme on l'a vu plus tôt, il est possible que certaines tâches soient sous la responsabilité de plusieurs ports d'attache. Cette situation risque de produire un grand nombre de journées de travail ayant des tâches communes. De façon à produire une plus grande variété de journées de travail pour ces ports d'attache et d'éviter les recouvrements multiples de tâches, on utilise le générateur de la façon suivante à chaque itération de la phase de génération :

Si le port d'attache comporte des tâches sous la responsabilité commune avec d'autres ports d'attache, alors

Étape 1

i) générer des journées de travail;

ii) ne conserver que les journées de travail contenant des tâches sous la responsabilité commune avec d'autres ports d'attache;

iii) retirer ces tâches de l'ensemble de tâches du port d'attache traité;

Étape 2

i) générer des journées de travail pour les tâches qui restent;

ii) conserver toutes les journées de travail générées.

Exemple :

Soit les ports d'attache A et B responsables des tâches suivantes :

port d'attache A → tâches : 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10

port d'attache B → tâches : 6-7-8-9-10-11-12-13-14-15.

Ces deux ports d'attache ont en commun les tâches 6 à 10.

Premièrement, on génère pour le port d'attache A des journées de travail contenant les tâches de 1 à 10, mais on ne conserve que les journées de travail contenant les tâches de 6 à 10. Ces dernières tâches sont retirées de l'ensemble de tâches traitées. Deuxièmement, on génère des journées de travail pour les tâches de 1 à 5, puis on conserve toutes les journées de travail générées. Le même processus est ensuite appliqué avec les tâches du port d'attache B.

CHAPITRE 4

PHASE DE SÉLECTION DE JOURNÉES DE TRAVAIL

La phase de génération des journées de travail a permis d'énumérer un sous-ensemble Ω' de journées de travail intéressantes représentées dans notre modèle par des colonnes. La phase de sélection de journées choisira donc parmi celles-ci, un sous-ensemble de journées $\Omega^* \subset \Omega'$, minimisant les coûts.

Ainsi, le modèle 2 présenté plus tôt, sera modifié en remplaçant les ensembles de journées de travail par des sous-ensembles de journées de travail.

Introduisons tout d'abord la notation suivante :

Ω' : l'ensemble de journées de travail produites par la phase de génération.

Ω'_{PL} : l'ensemble de journées à temps plein incluses dans Ω'.

Ω'_{PA} : l'ensemble de journées à temps partiel incluses dans Ω'.

Le nouveau problème que nous voulons résoudre s'écrit alors de la façon suivante :

Problème 3

$$\text{Min} \quad \sum_{j \in \Omega'} c_j y_j$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j \in \Omega'} \delta_{ij} y_j \geq 1 \qquad \forall i \in F \qquad (1)$$

$$\sum_{j \in \Omega'} \gamma_{pj} y_j \geq D_p \qquad \forall p \in P \qquad (2)$$

$$(1-\alpha) \sum_{j \in \Omega'_{PL}} y_j - \alpha \sum_{j \in \Omega'_{PA}} y_j \geq 0 \qquad (3)$$

$$y_j = 0 \text{ ou } 1 \qquad \forall j \in \Omega' \qquad (4)$$

4.1 Relaxation et résolution du modèle de recouvrement avec contraintes supplémentaires

La méthode de résolution du problème 3 consiste à relaxer dans un premier temps les contraintes d'intégralité (4) du modèle. On résout alors le modèle relaxé par l'algorithme du simplexe en utilisant les sous- routines FORTRAN de la librairie mathématique XMP [13]. Cette librairie facilite l'implantation des techniques de branchement que nous verrons plus loin tout en permettant de traiter des problèmes de taille moyenne (jusqu'à 300 contraintes).

L'utilisation de l'algorithme du simplexe pose toutefois le problème de la dégénérescence. En effet, chaque journée de travail peut recouvrir environ d'une à cinq tâches à points de demande fixes, ce qui implique que plusieurs variables de base associées aux contraintes de recouvrement (1) ont pour valeur zéro, d'où l'apparition de pivots dégénérés. Pour surmonter ce problème, on perturbe le terme de droite des contraintes de recouvrement en y ajoutant une petite quantité ε lorsque débute la dégénérescence. Quand l'optimalité est atteinte, on retire cette perturbation et on réoptimise. La figure 4.1 illustre ce processus.

Les contraintes d'intégralité ayant été relaxées, la prochaine étape consiste à obtenir une solution entière.

4.2 Obtention d'une solution entière

Le problème est en sa nature très peu entier, au sens où il arrive rarement que la solution du modèle relaxé soit entière. Notre expérimentation numérique a indiqué que les contraintes définies en (2) en sont la principale cause puisque la solution du modèle relaxé sans ces contraintes comporte en général, peu de variables fractionnaires.

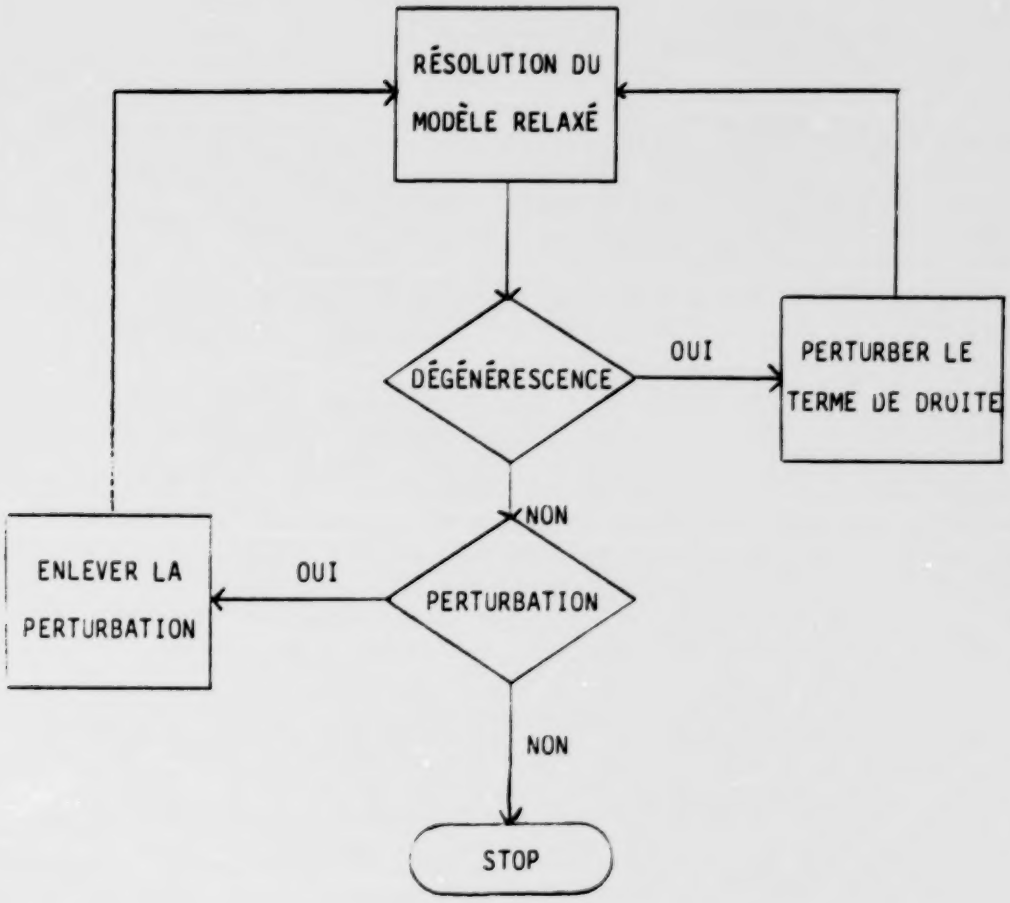


Figure 4.1 : Résolution du modèle relaxé

Pour obtenir l'intégralité de la solution, on utilise une technique de branchement. On retrouve dans la littérature, plusieurs exemples d'utilisation de cette technique. La méthode classique consiste à bâtir un arbre binaire où l'on retrouve le long de chacune des branches une variable fractionnaire fixée à un ou à zéro, ce qu'on appellera un branchement de type 0-1 (figure 4.2).

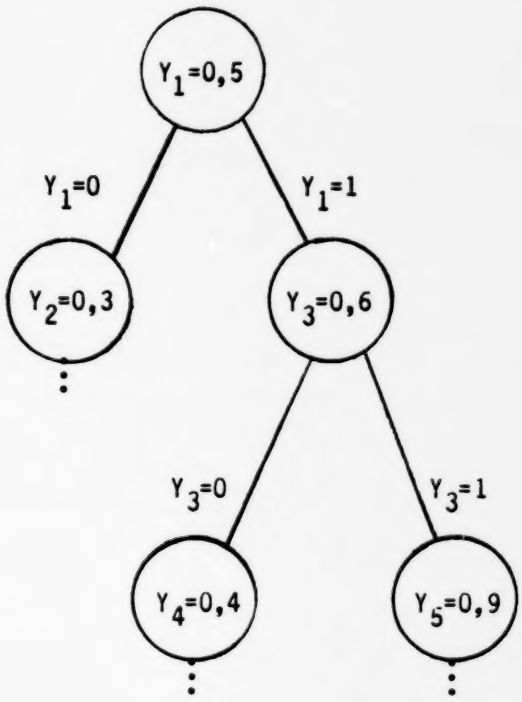


Figure 4.2 : Branchement de type 0-1 sur les variables fractionnaires

Cette technique s'est toutefois avérée inefficace pour notre problème car le nombre de variables fractionnaires dans la solution du modèle relaxé est élevé (jusqu'à 50 variables). En transport scolaire, Desrosiers et al. [4] utilise une technique de branchement introduite par Carpaneto et Toth [2] pour la résolution du problème du commis-voyageur à coût non-symétrique. Cette méthode consiste à forcer et à interdire certaines séquences de tâches contenues dans une variable fractionnaire. Cette méthode n'a pas été retenu pour deux raisons. La première est qu'elle s'adapte mal au fait que nos processus de génération et de sélection de

journées de travail sont séquentiels et qu'on ne considère pas l'introduction de nouvelles journées de travail contrairement à ce qui a été fait dans une technique de génération de colonnes. La seconde est la présence de journées de travail "vides" dans notre ensemble de journées, ce qu'on ne retrouvait pas en transport scolaire. La base de ce branchement étant les tâches, il devient alors impossible de "brancher" sur de telles journées de travail.

Tout cela nous a conduit à développer une technique de branchement mieux adaptée à notre approche globale de résolution du problème.

L'idée consiste à définir le branchement à l'aide de coupes pour modifier le domaine réalisable du problème 3 relaxé permettant ainsi de mieux cerner les solutions entières. Pour ce faire, plutôt que de "brancher" sur des variables fractionnaires, on "branche" sur différentes sommes fractionnaires de variables. Toutefois, si la solution fractionnaire à un noeud de l'arbre ne comporte pas de telles sommes, on applique un branchement de type 0-1 sur les variables. On retrouve dans le tableau 4.1 les cinq critères de branchement en ordre de priorité décroissante.

L'arbre construit en est un binaire où chaque noeud représente un problème et chaque branche impose une nouvelle contrainte découlant du critère de branchement le plus prioritaire.

Ainsi, si à un noeud donné, la somme totale des variables associées aux journées à temps partiel, notons la TPA_G, est fractionnaire, on crée alors deux descendants en ajoutant les contraintes suivantes :

"fils" de gauche : $\sum_{j \in \Omega'_{PA}} y_j \leq \lfloor TPA_G \rfloor$

"fils" de droite : $\sum_{j\in\Omega'_{PA}} y_j > \lceil TPA_G \rceil$

où $\lfloor x \rfloor$ est le plus grand entier inférieur ou égal à x, et $\lceil x \rceil$ le plus petit entier supérieur ou égal à x.

Tableau 4.1 : Critères de branchement sur des sous-sommes

Critère	Type de branchement
1	Somme totale fractionnaire des variables associées aux journées à temps partiel.
2	Somme totale fractionnaire des variables associées aux journées à temps plein.
3	Somme fractionnaire des variables associées aux journées à temps partiel d'un port d'attache.
4	Somme fractionnaire des variables associées aux journées à temps plein d'un port d'attache.
5	Variable fractionnaire

Si à un noeud donné, TPL_G, la somme totale des variables associées aux journées à temps plein est fractionnaire, on crée alors deux descendants en ajoutant les contraintes suivantes :

"fils" de gauche : $\sum_{j\in\Omega'_{PL}} y_j < \lfloor {}_G TPL \rfloor$

"fils" de droite : $\sum_{j\in\Omega'_{PL}} y_j > \lceil {}_G TPL \rceil$

De façon similaire, si à un noeud donné, $TPA_{\bar{p}}$, la somme totale

des variables associées au port d'attache $\bar{p}$ est fractionnaire ($\bar{p}$ étant le port d'attache où la partie fractionnaire de la somme est la plus près de 0,4 ou 0,6), on crée alors deux "fils" à ce noeud où pour le "fils" de gauche, on ajoute la contrainte :

$$\sum_{j \in \Omega'_{PA_{\bar{p}}}} y_j \leq \lfloor TPA_{\bar{p}} \rfloor$$

et pour le "fils" de droite :

$$\sum_{j \in \Omega'_{PA_{\bar{p}}}} y_j \geq \lceil TPA_{\bar{p}} \rceil$$

$\Omega'_{PA_{\bar{p}}}$ étant l'ensemble des journées à temps partiel au port d'attache $\bar{p}$.

Si $TPL_{\bar{p}}$, la somme des variables associées aux journées à temps plein au port d'attache $\bar{p}$ est fractionnaire ($\bar{p}$ étant le port d'attache où la partie fractionnaire de la somme est la plus près de 0,4 ou 0,6), alors on crée deux "fils" à ce noeud où pour le "fils" de gauche, on ajoute la contrainte :

$$\sum_{j \in \Omega'_{PL_{\bar{p}}}} y_j \leq \lfloor TPL_{\bar{p}} \rfloor$$

et pour le "fils" de droite :

$$\sum_{j \in \Omega'_{PL_{\bar{p}}}} y_j \geq \lceil TPL_{\bar{p}} \rceil$$

$\Omega'_{PL_{\bar{p}}}$ étant l'ensemble des journées à temps plein au port d'attache $\bar{p}$.

Finalement, si toutes les sous-sommes décrites précédemment sont entières et qu'il existe encore des variables fractionnaires; on choisit parmi celles-ci, celle qui est associée à la journée de travail ayant le plus de temps de disponibilité utile. Cette variable est alors fixée à zéro dans le problème associé au "fils" de gauche et à un, dans celui associé au "fils" de droite.

Le choix du port d'attache dans le cas des troisième et quatrième critères de branchement repose sur les expériences de Desrosiers et al. [7]. En effet, ceux-ci notent que le branchement devient plus efficace lorsqu'il est complété sur une somme de variables dont la partie fractionnaire est près de 0,4 ou 0,6. Quant au choix de la variable fractionnaire du cinquième critère de branchement, il a été fait sur la base d'expérimentation. En effet, lorsqu'aucun des quatre premiers critères ne s'appliquent, il semble que l'apparition de variables fractionnaires est généralement causée par la contrainte sur la demande variable d'un port d'attache. Il apparaît alors intuitivement logique de retenir pour le branchement la journée de travail ayant le plus grand temps de disponibilité utile.

4.3 Obtention d'une borne supérieure sur la fonction économique

L'efficacité d'une technique de branchement repose sur le calcul d'une bonne borne supérieure sur la valeur de l'objectif du modèle afin de réduire de façon significative la taille de l'arbre. Cette borne est obtenue en appliquant le processus de branchement sur un domaine réalisable restreint. Pour restreindre celui-ci, on ajoute des contraintes supplémentaires après la résolution du problème relaxé à la racine de l'arbre. On parlera de coupes pour désigner ces contraintes.

Ainsi, soit α, où $0<\alpha<1$, pour chaque $\bar{p}\in P$ où $TPL_{\bar{p}}$ est fractionnaire si $TPL_{\bar{p}} - \lfloor TPL_{\bar{p}} \rfloor > \alpha$ alors la contrainte suivante est ajoutée :

$$\sum_{j\in\Omega'_{PL_{\bar{p}}}} y_j \geq \lceil TPL_{\bar{p}} \rceil$$

si $TPL_{\bar{p}} - \lfloor TPL_{\bar{p}} \rfloor < \alpha$ alors la contrainte suivante est ajoutée :

$$\sum_{j\in\Omega'_{PL_{\bar{p}}}} y_j \geq \lfloor TPL_{\bar{p}} \rfloor$$

Il va s'en dire que plus α est petit, plus ces contraintes restreignent le domaine réalisable favorisant ainsi l'obtention d'une solution entière. On applique donc la technique de branchement à plusieurs reprises en augmentant graduellement la valeur de α afin d'agrandir le domaine réalisable. La valeur d'une solution trouvée pour un α donné constitue alors une borne supérieure sur l'objectif des problèmes résolus pour un $\alpha' > \alpha$.

4.4 Ordre de traitement des problèmes

De façon à obtenir le plus rapidement possible une solution entière, nous effectuons une recherche en profondeur dans l'arbre. Ainsi, après avoir obtenu une solution fractionnaire dont la valeur est inférieure à la borne supérieure, on résout un de ses descendants. On choisit celui-ci de la façon suivante : soit β où $0<\beta<1$; lorsque le branchement est de type 1, 2, 3 ou 4, on résout le "fils" de gauche si la partie fractionnaire de la somme de variables considérée est inférieure à β, sinon on résout celui de droite. L'expérimentation a démontré que 0,4 est une bonne valeur de β.

Pour un branchement de type 5, on résout le "fils" de droite car le fait de forcer une variable à un est beaucoup plus contraignant que de la fixer à zéro.

Les problèmes non-résolus sont empilés en ordre croissant de la valeur de l'objectif de leur "père" qui constitue une borne inférieure sur leur valeur optimale. Ainsi, lorsqu'une solution entière est trouvée, la borne supérieure est mise à jour et le prochain problème à résoudre est celui sur le dessus de la pile. Si un problème n'est pas réalisable, alors le prochain problème à résoudre est son "frère". Toutefois, si ce dernier a déjà été traité, on choisit celui sur le dessus de la pile.

4.5 Arrêt du processus de résolution

L'exploration totale de l'arbre de branchement risque toutefois d'engendrer, dans certains cas, des temps d'exécution fort considérables. De façon à éviter toute perte de temps consacrée à la recherche d'une faible amélioration de la valeur de la fonction économique, on se définit un pourcentage de tolérance sur la valeur optimale de celle-ci. Ainsi, lorsque cette tolérance est atteinte, on arrête le processus de résolution du problème. Ce pourcentage est calculé à partir de la valeur de la meilleure solution entière rencontrée et d'une borne inférieure sur la valeur de la solution optimale. Cette borne est celle qui est associée au problème sur le dessus de la pile. En effet, celle-ci constitue une borne inférieure car la valeur de tous les problèmes empilés et de leurs descendants est supérieure à cette borne. Par conséquent, on arrête le processus de résolution si

$$\left(\frac{OBJ_c - BPILE}{BPILE}\right) \times 100\% < \gamma\%$$

où

OBJ_c : valeur de la meilleure solution entière.

BPILE : borne inférieure associée au problème au-dessus de la pile.

γ : pourcentage de tolérance.

Par ailleurs, après la résolution du problème modifié par l'ajout des coupes, on peut calculer le pourcentage de gain possible sur la valeur de la fonction économique de la façon suivante :

$$GAIN_\alpha = \left(\frac{OBJ_c - OBJ_\alpha}{OBJ_\alpha} \right) \times 100\%$$

où

OBJ_α : valeur de la solution du problème relaxé modifié par les coupes.

Ainsi, dans le but d'assurer une amélioration non-négligeable de la valeur de la meilleure solution entière, on appliquera pour chacun des α le processus de branchement uniquement si $GAIN_\alpha\% > \rho\%$. Par ailleurs, cette condition sera court-circuitée s'il le faut pour permettre d'appliquer le processus de branchement avec le plus grande valeur de α qu'on veut considérer car lors de cette dernière phase du processus, on est intéressé à toute amélioration même négligeable.

Ceci termine donc la présentation de la technique de branchement proposée. La figure 4.3 résume le processus. On y emploie la notation suivante, soit :

α_i : la $i^{ième}$ valeur de α, $1 \leq i \leq n$.

OBJ : la valeur de la solution du problème à un noeud de l'arbre.

OBJ_c : la valeur de la meilleure solution entière (i.e. la borne supérieure).

L'arbre de branchement de la figure 4.4 illustre un exemple simple de la technique de branchement. Dans cet exemple, α, β et γ prennent respectivement les valeurs de 0,4, 0,4 et 1. À chaque noeud de l'arbre, on retrouve la valeur de la solution et à chaque branche, la contrainte imposée. Les noeuds marqués d'un E indique que la solution obtenue à ce noeud est entière.

Le noeud 0 représente la résolution du modèle relaxé, on retrouve à ce noeud une solution ayant trois sommes fractionnaires de variables associées aux journées à temps plein d'un port d'attache, i.e. que TPL_4, TPL_{10} et TPL_{12} prennent respectivement les valeurs suivantes : 4,7, 6,2 et 3,8. La partie fractionnaire de TPL_4 et TPL_{12} étant supérieure à α, on a imposé les coupes suivantes :

$$TPL_4 \geq 5 \quad \text{et} \quad TPL_{12} \geq 4.$$

La partie fractionnaire de TPL_{10} étant inférieure à α, on a imposé la coupe suivante :

$$TPL_{10} \geq 6.$$

Suite à l'introduction simultanée de ces coupes, on résout le problème associée au noeud 1. À ce noeud, on obtient une solution fractionnaire où TPA_G, valeur associée au critère le plus prioritaire, est égale à 30,3. On crée alors le problème du noeud 2 où TPA_G devra être inférieure

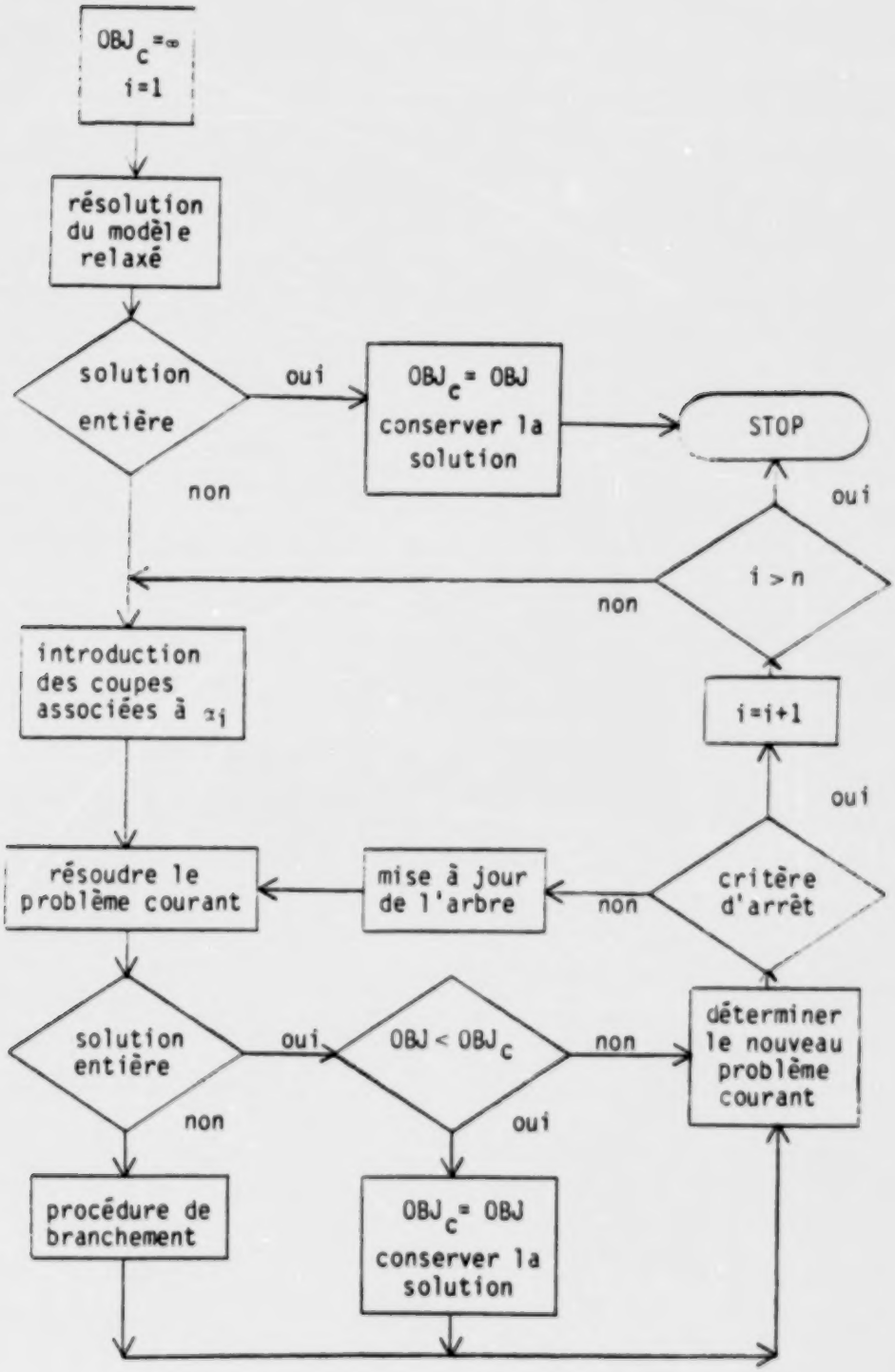


Figure 4.3 : Vue globale de la technique de branchement

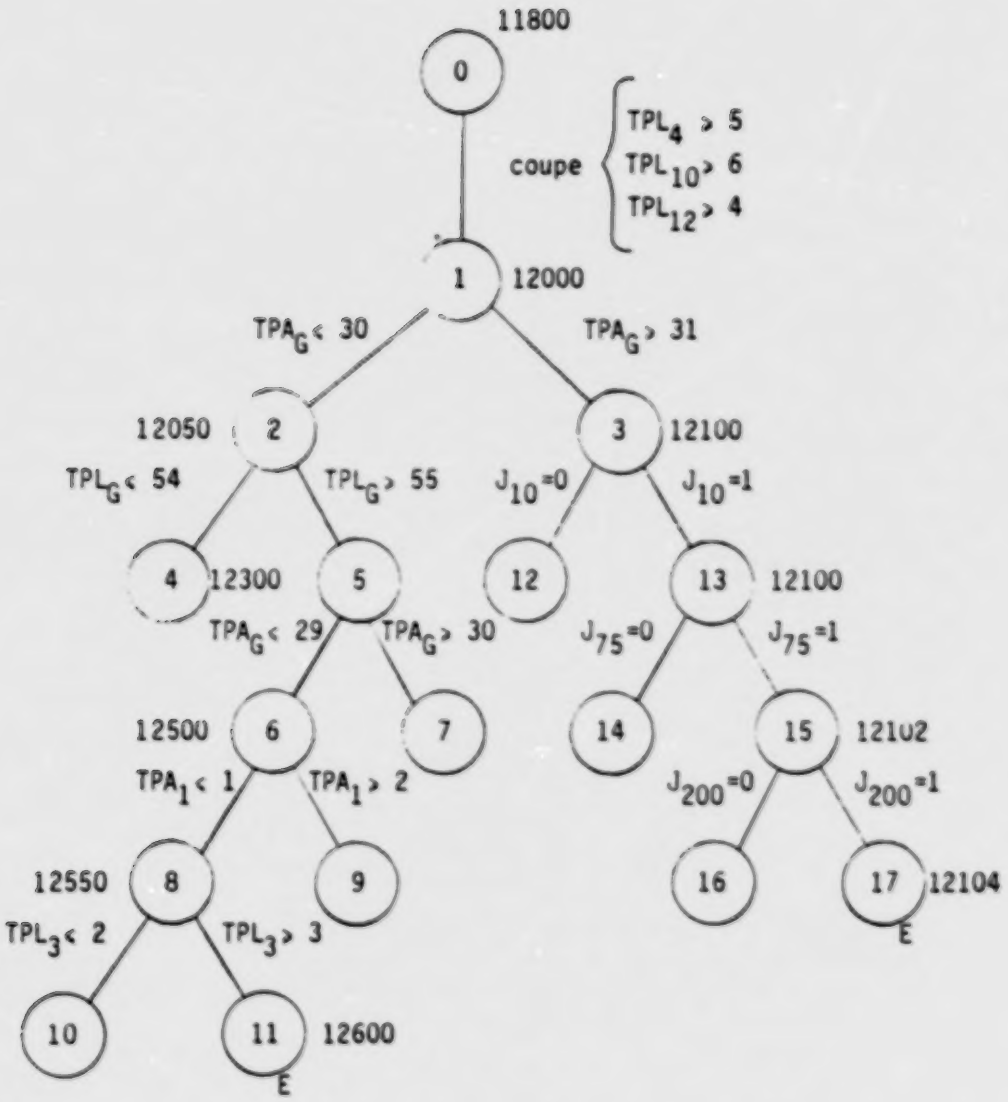


Figure 4.4 : Exemple d'un arbre de branchement

ou égale à 30 et du noeud 3, où TPA_G devra être supérieure ou égale à 31. On résout alors le problème au noeud 2 car la partie fractionnaire de TPA_G est inférieure à β; le problème 3 étant mis de côté dans la pile de problème.

Le processus de branchement se poursuit en résolvant dans l'ordre les problèmes associés aux noeuds suivants : 5, 6, 8 et 11. Au noeud 11, la solution est entière, mais sa valeur est à plus de γ % de la plus petite borne des problèmes empilés, i.e. le noeud 3 ayant comme borne 12 000. On poursuit donc en résolvant les problèmes associés aux noeuds 3, 13, 15 et 17. Une solution entière est obtenue au noeud 17 et sa valeur est à moins de γ % de la plus petite borne des problèmes empilés, soit le noeud 4 ayant comme borne 12 050. Le critère d'arrêt sur la tolérance étant alors satisfait, on arrête le processus de branchement pour cette valeur de α. On recommence alors le même processus de branchement pour le prochain α dans le but d'améliorer la valeur de la meilleure solution entière.

4.6 Découpage et insertion des activités à points de demande variables

La phase de sélection a permis d'obtenir un ensemble de journées de travail recouvrant les tâches à points de demande fixes et contenant à chaque port d'attache un temps total de disponibilité utile suffisant pour couvrir la demande variable. La phase d'insertion des activités à points de demande variables consiste donc à découper en plusieurs tâches la demande totale de chacun des ports d'attache et à insérer ces tâches dans les journées de travail des chauffeurs affectés à ceux-ci.

Le découpage de la demande variable totale est complété en faisant l'intersection du cadre-horaire de la demande et de chacun des intervalles de temps où les chauffeurs sont en disponibilité. Si la longueur de cette

intersection s'avère supérieure ou égale à la longueur minimale d'une tâche à points de demande variables, alors on insère une nouvelle tâche dans cette intersection. Les points d'origine et de destination de la tâche nouvellement créée n'étant pas connus puisque cette demande est variable, on ne peut insérer un déplacement à vide entre la tâche créée et les tâches qui la précède et la succède.

Après l'insertion de la demande variable, il est possible de retrouver dans une journée de travail une période de disponibilité située au delà du minimum garanti car, rappellons-le, nous avons généré des journées de travail ayant un temps payé égal au minimum et au maximum de leur type. Si tel est le cas, on peut raccourcir cette journée jusqu'à concurrence du minimum garanti permettant ainsi une économie au niveau du salaire du chauffeur. L'insertion de la demande variable se fera donc de façon à favoriser cette situation. On traitera tout d'abord les journées ayant un temps payé égal au minimum garanti de leur type. Par la suite, on traitera les journées ayant un temps payé supérieur au minimum garanti de leur type en commençant par les journées ayant le salaire horaire en temps supplémentaire le moins élevé.

On peut donc résumer le processus de découpage et d'insertion de la façon suivante :

pour chaque port d'attache faire

    pour chaque journée de travail du port d'attache ayant un temps payé égal au minimum garanti de leur type faire

        - insérer les activités à points de demande variables sous la responsabilité du port d'attache

pour chaque journée de travail du port d'attache ayant un temps payé supérieur au minimum garanti de leur type faire

- insérer les activités à points de demande variables sous la responsabilité du port d'attache.

À la fin du processus de découpage et d'insertion des activités à points de demande variables, nous avons les journées de travail finales des chauffeurs.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS NUMÉRIQUES

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus lors de l'application de notre heuristique à des données réelles. Ainsi, dans un premier temps, nous présentons la nature de ces données. Par la suite, nous présentons différents scénarios et leur analyse. Finalement, nous discutons de certains aspects de l'algorithme en se basant sur les résultats numériques obtenus.

5.1 Données utilisées

Les données utilisées proviennent du programme d'opérations version septembre 1984 du secteur centre-ville de la division de Montréal, secteur illustré à la figure 1.2.

Ces données comportent les éléments suivants :

- un programme d'opérations.
- les points d'origine et de destination de chaque tâche à points de demande fixes sous la forme d'une adresse ou d'une intersection de rues.
- lieu physique de chaque succursale et garage sous la forme d'une adresse ou d'une intersection de rues.
- le cadre-horaire de chaque tâche à points de demande fixes et des activités à points de demande variables de chaque port d'attache.
- un ensemble de paramètres reliés aux contraintes opérationnelles et syndicales.

Du programme d'opérations, nous avons tiré les informations suivantes : le temps de préparation au départ et à l'arrivée pour chaque

port d'attache, la durée de chaque tâche à points de demande fixes, le temps total des activités à points de demande variables de chaque port d'attache. De plus, l'ensemble des paramètres reliés aux contraintes opérationnelles et syndicales contient les informations suivantes :

- vitesse moyenne et coût horaire de déplacement des véhicules.
- pour chaque type de chauffeur :
  - le temps payé minimum garanti et maximum permis.
  - le coût fixe.
  - le taux-horaire du salaire de l'employé en temps régulier et supplémentaire.
  - pour chaque pause-café et repas auquel le chauffeur a droit :
    - la longueur minimale et maximale
    - la durée payée
    - le cadre-horaire.
- l'ensemble des tâches à points de demande fixes sous la responsabilité d'un port d'attache donné.

Caractéristiques des données

Le programme d'opérations du secteur centre-ville contient 167 tâches à points de demande fixes, une demande totale de 229h47 pour les activités à points de demande variables, réparties entre quinze succursales et deux garages (Hochelaga et Chabanel). On retrouve dans le tableau 5.1 la répartition des tâches à points de demande fixes et des activités à points de demande variables à l'intérieur de chacun des ports d'attache selon le programme d'opérations fourni. Ainsi pour chacun d'eux, on y indique le nombre de tâches à points de demande fixes de chaque type y étant affectées. Toutefois, étant donné qu'il peut y avoir responsabilité commune de plusieurs ports d'attache à l'égard d'une tâche, nous indiquons entre parenthèses le nombre de tâches qui pourraient leur être affectées.

Tableau 5.1 : Répartition des tâches à points de demande fixes et des activités à points de demande variables du secteur centre-ville.

port d'attache	nombre de tâches à points de demande fixes	relais	levée	navette	ramassage de colis	livraison de colis entre [08:30-18:00]	livraison spéciale entre [14:30-21:50]
Hochelaga (Succ. A)	36 (46)	15	19 (19)	2 (10)	0	26h05	00h00
Hochelaga (Place d'Armes)	7 (17)	4	3 (3)	0 (10)	0	14h04	00h00
Succursale H	11 (21)	6	4 (5)	1 (10)	0	21h28	00h00
Succursale N	6 (15)	4	1 (1)	1 (10)	0	19h42	00h00
Succursale D	1 (16)	1	0 (5)	0 (10)	0	03h26	00h00
Succursale F	2 (16)	1	1 (5)	0 (10)	0	01h59	00h00
Ile des Soeurs	2 (14)	1	0 (3)	1 (10)	0	03h14	00h00
Succursale R	6 (16)	4	1 (2)	1 (10)	0	21h12	00h00
Beaubien	4 (15)	3	2 (2)	1 (10)	0	15h40	00h00
Hochelaga (Delorimier)	6 (15)	3	2 (2)	1 (10)	0	10h07	00h00
Succursale C	5 (15)	4	1 (1)	0 (10)	0	16h41	00h00
Rosemont	8 (20)	3	4 (7)	1 (10)	0	06h49	00h00
Succursale M	8 (21)	4	3 (7)	1 (10)	0	11h29	00h00
Succursale K	8 (17)	5	2 (2)	1 (10)	0	16h22	00h00
Succursale E	2 (12)	2	0 (2)	0 (10)	0	10h26	00h00
Chabanel	55 (55)	0	46 (46)	2 (2)	7	00h00	31h03
TOTAL	167	60	88	12	7	198h44	31h03

Par exemple, les succursales M et Rosemont partagent la responsabilité de sept levées, trois d'entre elles étant affectées à la succursale Rosemont et les quatre autres à la succursale M.

Dans ce programme d'opérations, le garage Chabanel représente un cas particulier. En effet, on y retrouve une flotte de véhicules disponibles uniquement à partir de la mi-journée. Ainsi, dans le but d'utiliser ces véhicules, les planificateurs ont mis sous la responsabilité de ce port d'attache un ensemble de tâches à points de demande fixes et d'activités à points de demande variables situés en fin de journée et en soirée.

Il existe un nombre restreint de cadres-horaires différents pour les tâches à points de demande fixes. En effet, tous les relais doivent être terminés avant le début des routes de facteurs, i.e. avant 10:00 dans la majorité des cas. Quant aux levées, leur cadres-horaires permettent de les classer en différentes catégories, soit les levées débutant à 10:00, 12:30, 15:00, 16:00 et 17:30. Les navettes ont chacune un cadre-horaire situé à la mi-journée (i.e. vers 12:30) et en fin de journée (i.e. vers 17:00). De plus, le ramassage de colis se fait à partir de 14:30. La figure 5.1 illustre les caractéristiques de la distribution des cadres-horaires et des fenêtres de temps au cours de la journée. Ainsi, pour chaque intervalle de temps (i.e. de 8:00 à 8:15, de 8:15 à 8:30, etc.), on retrouve le nombre de tâches à points de demande fixes dont le cadre-horaire (un point) ou le cadre-horaire et la fenêtre de temps (une étoile) inclut l'intervalle. Ainsi, on constate que les activités situées en début de journée influenceront grandement le nombre de chauffeurs utilisés. On constate

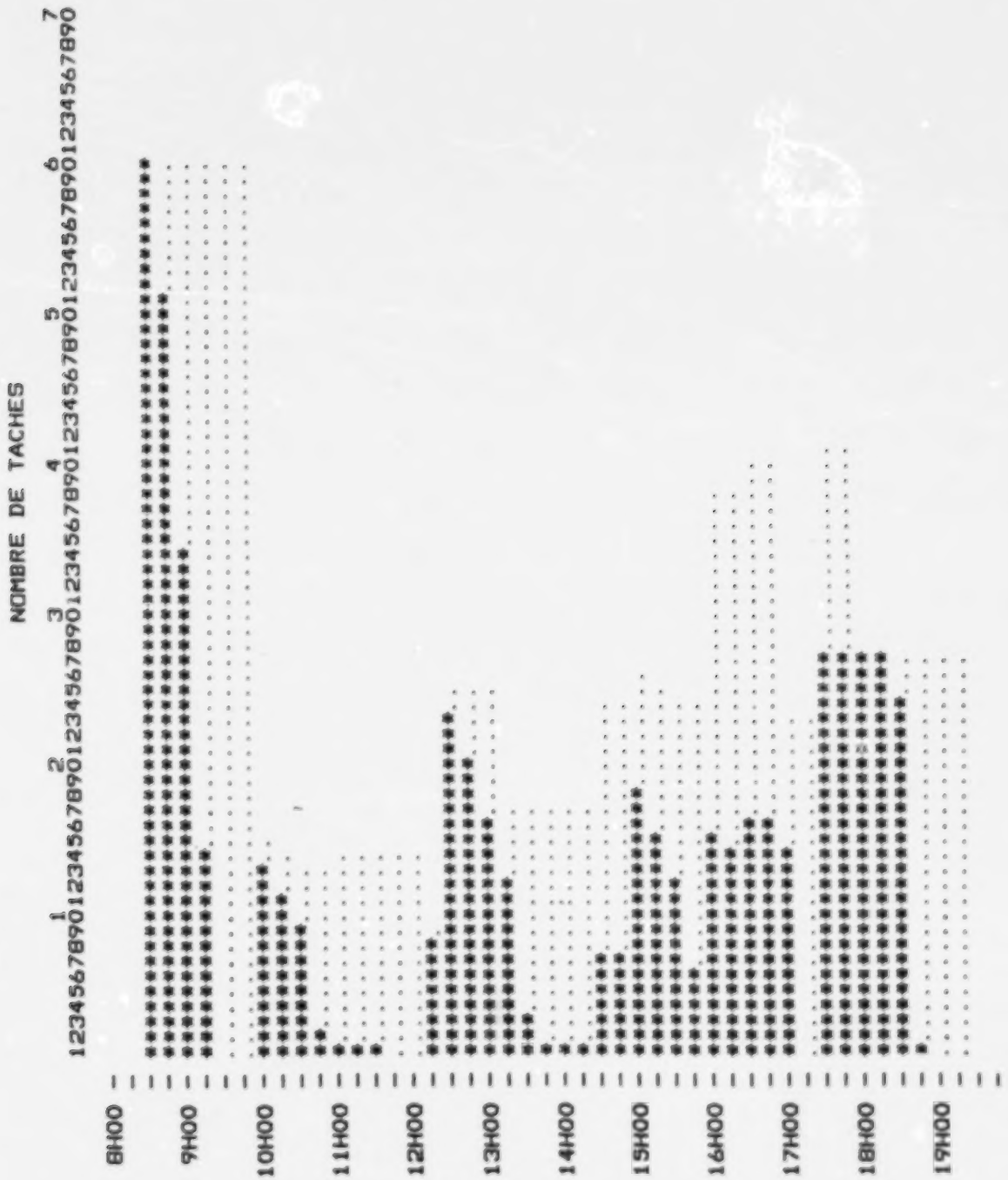


Figure 5.1 : Distribution des cadres-horaires et des fenêtres de temps

ensuite un creux à la mi-journée qui pourra être affecté aux activités à points de demande variables. Finalement, on observe une recrudescence des activités reliées au ramassage de colis et à la levée de boîtes aux lettres en fin de journée. Ce graphique nous donne une estimation du nombre minimum de chauffeurs requis pour effectuer les tâches à points de demande fixes aux différents moments de la journée car chaque tâche peut être entreprise à l'intérieur d'une fenêtre de temps. Ces estimations seront d'autant plus précises que les largeurs des fenêtres de temps seront réduites; à la limite, si toutes les tâches ont des fenêtres de temps de largeur égale à zéro, elles seront exactes. Les statistiques du tableau 5.2 indiquent toutefois que ce n'est pas le cas. De plus, l'addition du temps total réservé aux activités à points de demande variables viendra hausser ces estimations.

Tableau 5.2 : Statistiques sur les tâches à points de demande fixes

	relais	levée	navette	ramassage de colis
durée totale	60h07	114h02	6h53	18h40
durée moyenne	1h00	1h17	0h34	2h40
durée minimum	0h39	0h38	0h15	2h40
durée maximum	1h56	2h32	1h00	2h40
fenêtre largeur moyenne	0h30	0h50	0h25	0h20
fenêtre largeur minimum	0h00	0h03	0h04	0h20
fenêtre largeur maximum	0h51	1h52	0h45	0h20

5.2 Création d'une table de distance

La table de distance entre les lieux, i.e. les points d'origine et de destination des tâches, succursales et garages, est un élément fondamental dans le processus d'agencement. Les distances sont utilisées pour calculer les temps de déplacement entre les différents lieux. L'exactitude de l'évaluation des distances s'avère importante à cause des contraintes horaires reliées au transport postal.

Pour évaluer ces distances, on utilise un ensemble de programmes informatiques permettant de localiser géographiquement les lieux et de créer une table de distance entre eux. Ces programmes développés dans le cadre du transport des handicapés [16], utilise une base de données produite par Statistiques Canada décrivant le réseau routier. Celui-ci est représenté par un graphe où chaque arc est associé à un segment de rue et chaque noeud à une intersection.

Vu la grande taille du réseau complet associé au secteur centre-ville, nous avons dans un premier temps localisé les lieux sur le réseau complet pour ensuite les affecter au noeud le plus près d'un réseau agrégé non-orienté. Une table de distance a ensuite été créée entre chaque paire de lieux sur le réseau agrégé non-orienté. L'utilisation d'un tel réseau permet une précision suffisante tout en réduisant le temps d'exécution et l'utilisation d'espace-mémoire. On a constaté lors de la localisation des adresses de notre problème, une erreur moyenne de 150 mètres entre celles sur le réseau complet et celles sur le réseau agrégé. Pour ce qui est de l'erreur moyenne introduite par le calcul de la table de distance sur le réseau agrégé non-orienté, elle est difficile à quantifier, chaque cas étant particulier.

5.3 Étude de divers scénarios : Expérience no 1

Dans cette section, nous présentons 24 scénarios obtenus en faisant varier de façon systématique les quatre paramètres suivants : le ratio temps régulier et temps partiel, la durée minimum d'une tâche à points de demande variables, la flexibilité sur le cadre-horaire des tâches à points de demande fixes; et finalement, la possibilité de faire ou non du temps supplémentaire pour un chauffeur à temps régulier. Quant aux autres paramètres dont on retrouve les valeurs dans le tableau 5.3, ils demeurent fixes.

Tableau 5.3 : Caractérisques des journées
Expérience no 1

Heure de coupes : 8:30 Vitesse des véhicules : 35 km/h Coût horaire du véhicule : 20,00$				
	Temps partiel	Temps plein		
coût fixe	0,00$	0,00$		
minimum garanti	3h00 (13,11$/h)	8h00 (13,11$/h)		
maximum permis	5h00 (13,11$/h)	10h00 (18,67$/h)		
type de la pause	pause-café	pause-café a.m.	repas	pause-café p.m.
durée minimum	15 min	12 min	35 min	12 min
durée maximum	15 min	12 min	65 min	12 min
durée payée	15 min	12 min	5 min	12 min
fenêtre relative	0h00-5h00	1h05-3h15	3h15-5h00	5h15-7h00

On a mis sous la responsabilité des différents ports d'attache uniquement les tâches à points de demande fixes qui leur étaient affectées dans la solution manuelle. Par conséquent, dans cette expérimentation, les ports d'attache n'ont aucune responsabilité commune. On a utilisé un pourcentage de tolérance (γ) de 1%, i.e. que le processus de résolution pour chaque α, a été arrêté lorsque la meilleure solution entière était à moins de 1% de la borne inférieure sur le problème. Par ailleurs, la valeur de ρ a été fixée à 1,25%, i.e. qu'on n'explore pas l'arbre de branchement s'il ne permet pas d'espérer une amélioration d'au moins 1,25% de la meilleure solution et ce pour un α donné. De plus, une limite de 1875 sec. a été imposé sur le processus de branchement.

Les algorithmes ont été implantés en langage FORTRAN sur un ordinateur Cyber 835. Les résultats de l'expérimentation no 1 sont résumés dans deux tableaux. Premièrement, le tableau 5.4 présente des statistiques générales sur les solutions. On y retrouve les informations suivantes :

DIR. GÉN. : (A, B, C) où

A = durée minimum d'une tâche à points de demande variables (minutes).

B = le nombre de minutes de flexibilité sur le cadre-horaire des tâches à points de demande fixes.

C = O si le temps supplémentaire est permis, N sinon.

DIR. SÉL. : X% - Y% où

X = pourcentage maximal de journées à temps partiel.

Y = pourcentage minimal de journées à temps plein.

Tableau 5.4 : Statistiques générales : Expérience no 1

SCENARIO	DIR. GEN.	DIR. SEL.	NBVAR	TPA	TPL (SUPP)	TOTAL	EXC. VAR.	COUT	REND.	NB. FLEX.	CPU G-S-I
MANUEL	---	---	-----	15	72 (0)	87	0	17517	0.82	0	- - - - - - - - -
1A	(60,0,0)	20%-80%	485	16	64 (2)	80	49	16791	0.91	0	23.8-1903.2-15.3
1B	" "	40%-60%	485	33	50 (2)	83	8	16339	0.96	0	23.8-1936.9-15.6
1C	" "	60%-40%	485	47	44 (0)	91	34	16421	0.95	0	23.8-1903.0-16.2
2A	(60,0,N)	20%-80%	400	16	65 (0)	81	0	16828	0.90	0	19.3-1898.0-15.7
2B	" "	40%-60%	400	33	52 (0)	85	44	16425	0.95	0	19.3-1923.6-15.4
2C	" "	60%-40%	400	45	45 (0)	90	8	16403	0.95	0	19.3-1912.3-15.5
3A	(60,5,0)	20%-80%	483	16	65 (0)	81	0	16856	0.91	1	24.0-1924.9-15.8
3B	" "	40%-60%	483(199)	31	51 (2)	82	39	16352	0.96	0	48.1-2111.7-15.7
3C	" "	60%-40%	483	46	43 (0)	89	8	16326	0.96	0	24.0-1949.0-15.2
4A	(60,5,N)	20%-80%	399	15	66 (0)	81	0	16901	0.90	1	19.5-1925.6-15.7
4B	" "	40%-60%	399(177)	31	52 (0)	83	39	16404	0.95	0	19.5-2381.7-15.6
4C	" "	60%-40%	399	44	45 (0)	89	8	16363	0.96	0	19.5-1919.3-15.9
5A	(90,0,0)	20%-80%	485(199)	16	64 (3)	80	131	16859	0.91	0	47.8-2017.1-15.3
5B	" "	40%-60%	485	31	53 (4)	84	90	16572	0.94	0	23.9-1909.0-15.8
5C	" "	60%-40%	485	44	44 (2)	88	128	16413	0.95	0	23.9-1917.0-15.4
6A	(90,0,N)	20%-80%	400	14	69 (0)	83	130	17152	0.88	0	19.4-1922.1-16.1
6B	" "	40%-60%	400(108)	34	53 (0)	87	122	16657	0.93	0	34.7-2133.8-15.5
6C	" "	60%-40%	400	52	41 (0)	93	176	16480	0.95	0	19.4-1918.3-15.4
7A	(90,5,0)	20%-80%	483	16	64 (3)	80	72	16853	0.91	3	23.9-1916.7-15.8
7B	" "	40%-60%	483(204)	33	52 (3)	85	103	16567	0.94	1	47.5-2157.2-15.3
7C	" "	60%-40%	483	44	44 (2)	88	128	16413	0.95	0	23.9-1902.8-15.2
8A	(90,5,N)	20%-80%	399	16	67 (0)	83	108	17069	0.89	3	19.3-1918.9-15.7
8B	" "	40%-60%	399	32	54 (0)	86	206	16663	0.93	0	19.3-1900.7-15.5
8C	" "	60%-40%	399	49	42 (0)	91	153	16448	0.95	0	19.3-1897.7-15.2

NBVAR : nombre de variables (journées) générées. Lorsqu'il y a une phase de réoptimisation, le nombre de variables considérées est inscrit entre parenthèses.

TPA : nombre de chauffeurs à temps partiel dans la solution.

TPL (SUPP) : nombre de chauffeurs à temps plein dans la solution et entre parenthèses, le nombre effectuant du temps supplémentaire.

TOTAL : nombre total de chauffeurs.

REND : rendement = $\frac{\text{temps payé total - temps en disponibilité}}{\text{temps payé total}}$

EXC. VAR. : nombre de minutes excédant la demande totale des activités à points de demande variables.

NB. FLEX. : nombre de tâches utilisant la flexibilité sur leur cadre-horaire.

CPU G-S-I : temps d'exécution total pour les phases de génération de journées de travail (G), sélection de journées de travail (S) et découpage et insertion des activités à points de demande variables (I). Lorsque une réoptimisation s'est avérée nécessaire, on a inclut dans chaque total le temps y étant consacré.

Deuxièmement, le tableau 5.5 présente des statistiques sur la phase de sélection de journées de travail. On y retrouve les informations suivantes :

SCEN : numéro de scénario.

ALPHA : valeur de α.

SLN RÉEL : valeur de la solution à la racine de l'arbre.

SLN COUPE : valeur de la solution après l'introduction des coupes.

SLN ENT. : valeur de la meilleure soltuion entière trouvée. On retrouve entre parenthèses à quel pourcentage cette valeur était de la borne inférieure sur la valeur de la solution.

MAJ SLN : nombre de mise à jour de la meilleure solution entière avec entre parenthèses, le gain en pourcentage réalisé par rapport au α précédent.

STATS ARBRE : (A-B-C-D) où

A : nombre de noeuds dans l'arbre.

B : nombre de noeuds ayant des descendants.

C : profondeur de l'arbre.

D : nombre de recherches en profondeur effectuées.

STATS BRANC. : (A-B-C-D-E) où

A : nombre de branchements sur la somme totale des variables associées aux chauffeurs à temps partiel.

B : nombre de branchements sur la somme totale de variables associées aux chauffeurs à temps plein.

C : nombre de branchements sur les variables associées aux chauffeurs à temps partiel d'un port d'attache.

D : nombre de branchements sur les variables associées aux chauffeurs à temps plein d'un port d'attache.

E : nombre de branchements sur une variable associée à un chauffeur.

Tableau 5.5 : Statistiques sur la phase de sélection :
Expérience no 1

SCEN	ALPHA	SLN REEL.	SLN COUPE	SLN ENT.	MAJ SLN	STATS ARBRE	STATS BRANC.	CPU	
1A	0.00	12106	12574	12575 (0.01%)	1 (-)	4-2-2-1	1-0-0-0-0	39.2	%
	0.25	12106	12458	12575 (0.94%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	108.1	R *
	0.50	12106	12214	12301 (0.65%)	2 (2.18%)	74-37-22-6	2-2-13-3-16	257.4	% *
	0.75	12106	12109	12301 (1.18%)	0 (0.0%)	326-163-16-48	13-12-106-31-0	1470.8	T *
1B	0.00	11582	12032	12099 (0.56%)	1 (-)	18-9-9-1	2-0-0-0-6	106.6	% *
	0.25	11582	11917	12017 (0.84%)	1 (0.67%)	24-12-12-1	2-0-1-0-8	140.6	% *
	0.50	11582	11699	11815 (0.85%)	2 (1.68%)	288-144-34-27	10-3-80 16-34	720.8	% *
	0.75	11582	11588	11815 (1.73%)	0 (0.0%)	310-155-29-29	3-9-104-31-7	948.2	T *
1C	0.00	11477	11717	11893 (1.48%)	2 (-)	680-340-45-86	16-30-129-49-115	1876.4	T *
2A	0.00	12106	12574	12575 (0.01%)	1 (-)	4-2-2-1	1-0-0-0-0	30.3	%
	0.25	12106	12458	12575 (0.94%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	48.6	R
	0.50	12106	12214	12351 (0.90%)	3 (1.78%)	204-102-22-20	3-8-47-17-26	494.3	%
	0.75	12106	12109	12351 (1.56%)	0 (0.0%)	410-205-19-46	13-31-105-53-2	1301.6	T
2B	0.00	11582	12032	12099 (0.56%)	1 (-)	18-9-9-1	2-0-0-0-6	70.6	%
	0.25	11582	11917	12017 (0.83%)	1 (0.68%)	24-12-12-1	2-0-1-0-8	97.8	%
	0.50	11582	11699	11917 (1.47%)	2 (0.83%)	636-318-32-86	14-21-177-51-54	1731.0	T
2C	0.00	11477	11717	11886 (1.41%)	3 (-)	870-435-43 78	22-43-169-63-137	1889.7	T

Tableau 5.5 : Statistiques sur la phase de sélection :
Expérience no 1 (suite)

SCEN	ALPHA	SLN REEL	SLN COUPE	SLN ENT.	MAJ SLN	STATS ARBRE	STATS BRANC.	CPU	
3A	0.00	12048	12496	12498 (0.01%)	1 (-)	4-2-2-1	1-0-0-0-0	37.0	%
	0.25	12048	12380	12498 (0.95%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	74.2	R
	0.50	12048	12172	12317 (0.84%)	2 (1.45%)	456-228-17-67	6-20-124-57-20	1462.8	%
	0.75	12048	12060	12317 (1.88%)	0 (0.0%)	102-51-16-13	2-5-35-8-0	322.5	T *
3B	0.00	11584	12035	12081 (0.38%)	1 (-)	16-8-8-1	1-0-0-0-6	69.2	%
	0.25	11584	11920	11999 (0.66%)	1 (0.67%)	24-12-12-1	1-0-2-0-8	139.9	% *
	0.50	11584	11702	11866 (1.10%)	4 (1.11%)	672-336-31-83	20-10-173-46-86	1669.1	T
REOPT	0.50	11689	11766	11866 (0.66%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	18.0	R
	0.75	11689	11689	11795 (0.90%)	2 (0.60%)	104-52-15-13	7-9-4-10-21	173.6	%
3C	0.00	11477	11717	11802 (0.72%)	1 (-)	80-40-40-2	2-2-12-4-19	170.3	% *
	0.25	11477	11676	11802 (1.07%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	105.8	R *
	0.50	11477	11552	11802 (2.14%)	0 (0.0%)	542-271-24-61	6-11-200-53-0	1645.1	T *
4A	0.00	12048	12496	12498 (0.01%)	1 (-)	4-2-2-1	1-0-0-0-0	33.3	%
	0.25	12048	12380	12498 (0.95%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	47.8	R
	0.50	12048	12172	12358 (0.89%)	2 (1.12%)	476-238-17-93	4-29-116-55-23	1539.5	%
	0.75	12048	12060	12358 (2.21%)	0 (0.0%)	76-38-15-10	2-5-26-4-0	282.3	T
4B	0.00	11584	12035	12081 (0.38%)	1 (-)	16-8-8-1	1-0-0-0-6	55.6	%
	0.25	11584	11920	11999 (0.66%)	1 (0.67%)	24-12-12-1	1-0-2-0-8	99.4	% *
	0.50	11584	11702	11916 (1.50%)	2 (0.69%)	654-327-31-94	11-19-181-52-63	1743.7	T *
REOPT	0.50	11680	11752	11900 (0.99%)	2 (0.13%)	96-48-15-14	6-9-5-4-23	183.9	%
	0.75	11680	11680	11845 (0.99%)	1 (0.46%)	120-60-17-26	9-14-7-14-15	263.0	%
4C	0.00	11477	11717	11849 (1.09%)	4 (-)	816-408-38-83	21-51-178-71-86	1896.8	T

Tableau 5.5 : Statistiques sur la phase de sélection :
Expérience no 1 (suite)

SCEN	ALPHA	SLN REEL	SLN COUPE	SLN ENT.	MAJ SLN	STATS ARBRE	STATS BRANC.	CPU	
5A	0.00	12129	12740	12777 (0.29%)	1 (-)	8-4-4-1	1-1-0-0-1	46.2	%
	0.25	12129	12534	12629 (0.74%)	2 (1.16%)	32-16-11-2	2-2-4-0-7	162.0	%
	0.50	12129	12247	12434 (1.18%)	2 (1.54%)	602-301-28-40	5-16-106-63-110	1702.3	T *
REOPT	0.50	12252	12319	12434 (0.93%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	21.6	R
	0.75	12252	12252	12394 (0.91%)	1 (0.32%)	16-8-7-2	1-1-0-2-3	42.5	%
5B	0.00	11648	12151	12228 (0.63%)	1 (-)	36-18-18-1	1-0-1-0-15	102.9	%
	0.25	11648	11949	12118 (1.24%)	2 (0.89%)	312-156-29-65	15-11-30-3-96	1783.0	T *
5C	0.00	11508	11782	11938 (1.28%)	3 (-)	754-377-56-33	15-30-95-35-201	1893.5	T
6A	0.00	12129	12740	12777 (0.29%)	1 (-)	8-4-4-1	1-1-0-0-1	36.3	%
	0.25	12129	12534	12629 (0.71%)	2 (1.16%)	56-28-17-3	4-4-10-2-7	169.1	%
	0.50	12129	12247	12629 (2.57%)	0 (0.0%)	430-215-23-81	7-38-96-73-0	1693.9	T
6B	0.00	11651	12189	12247 (0.47%)	1 (-)	24-12-12-1	1-0-0-0-10	95.2	%
	0.25	11651	11968	12174 (1.47%)	1 (0.59%)	562-281-36-58	10-39-87-47-95	1822.1	T
REOPT	0.25	11908	12070	12174 (0.86%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	9.0	R
	0.50	11908	12012	12101 (0.74%)	1 (0.6%)	18-9-9-1	1-1-0-1-5	17.9	%
	0.75	11908	11938	12101 (0.98%)	0 (0.0%)	82-41-14-19	7-11-0-13-9	69.0	%
	1.00	11908	11908	12101 (0.88%)	0 (0.0%)	82-41-12-27	7-15-0-18-0	89.6	%
6C	0.00	11508	11784	11921 (1.13%)	4 (-)	768-384-48-60	23-53-137-78-92	1899.9	T

Tableau 5.5 : Statistiques sur la phase de sélection :
Expérience no 1 (suite)

SCEN	ALPHA	SLN REEL	SLN COUPE	SLN ENT.	MAJ SLN	STATS ARBRE	STATS BRANC.	CPU	
7A	0.00	12069	12657	12696 (0.31%)	1 (-)	10-5-5-1	1-0-0-0-3	47.3	%
	0.25	12069	12452	12548 (0.77%)	2 (1.17%)	96-48-16-4	4-3-17-1-22	235.7	%
	0.50	12069	12206	12386 (1.18%)	1 (1.29%)	492-246-19-74	8-12-165-46-14	1606.4	T
7B	0.00	11655	12115	12220 (0.86%)	2 (-)	144-72-32-14	4-4-16-6-41	361.3	%
	0.25	11655	11935	12074 (1.09%)	3 (1.19%)	656-328-35-111	8-7-25-2-285	1514.0	T *
REOPT	0.25	11879	12016	12074 (0.48%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	20.6	R
	0.50	11879	11950	12074 (1.03%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	21.6	R
	0.75	11879	11879	12043 (0.88%)	1 (0.26%)	78-39-10-19	7-9-5-12-5	197.3	%
7C	0.00	11508	11782	11938 (1.28%)	4 (-)	896-448-49-40	17-28-118-33-251	1876.6	T *
8A	0.00	12069	12657	12696 (0.31%)	1 (-)	10-5-5-1	1-0-0-0-3	40.9	%
	0.25	12069	12452	12548 (0.72%)	2 (1.17%)	64-32-16-6	3-3-14-1-10	174.1	%
	0.50	12069	12206	12511 (2.05%)	1 (0.29%)	538-269-27-118	8-34-149-68-9	1681.5	T
8B	0.00	11659	12153	12239 (0.70%)	2 (-)	118-59-25-13	4-4-12-4-34	278.7	%
	0.25	11659	11933	12104 (1.17%)	2 (1.10%)	510-255-36-74	2-29-116-35-62	1600.1	T
8C	0.00	11508	11784	11917 (1.09%)	5 (-)	988-494-50-79	9-65-171-99-129	1876.2	T

CPU : temps d'exécution (en secondes).

De plus, on retrouve en fin de ligne un ou plusieurs des symboles suivants :

% : arrêt d'exécution causé par le facteur de tolérance γ (i.e. l'écart avec la borne inférieure).

R : arrêt d'exécution causé par le facteur de tolérance ρ (i.e. le pourcentage de gain possible).

T : arrêt d'exécution causé par la limite de temps.

* : dégénérescence rencontrée lors de la résolution.

Voyons maintenant à partir de ces résultats si le modèle fournit des solutions cohérentes avec la variation des divers paramètres variables. Mais avant d'aller plus loin, rappellons que lors de l'insertion de la demande variable, on se permet dans certains cas d'insérer à l'horaire un peu plus de temps pour ces activités afin de satisfaire la contrainte sur la durée minimale d'une tâche à points de demande variables. Ce temps en excès nous est indiqué par la quantité EXC.VAR du tableau 5.4. Il faut donc considérer cette quantité lorsque l'on compare deux solutions car chaque minute consacrée à la demande variable implique un coût d'utilisation du véhicule.

On remarque tout d'abord que dans la plupart des cas, le coût est directement proportionnel au pourcentage de chauffeurs à temps plein. Ceci est tout à fait normal puisque l'utilisation de chauffeurs de ce type favorise l'apparition de périodes de disponibilité, telle que reflétée par la statistique sur le rendement (REND.). Les scénarios 1B et 1C

représentent toutefois une exception; en effet bien que les valeurs des solutions réelles indiquent une telle tendance, il semble que la limite de temps imposée sur le processus de branchement a empêché de faire ressortir la même tendance au niveau de la solution entière.

Au chapitre de l'opportunité d'utiliser des chauffeurs à temps plein pour effectuer du temps supplémentaire, cela permet de réduire les coûts dans des scénarios où l'on désire un pourcentage élevé de chauffeurs à temps plein. Fait intéressant à remarquer, la valeur de la solution du problème relaxé a presque toujours la même valeur dans les scénarios avec ou sans temps supplémentaire. Ceci s'explique par le fait que les variables peuvent prendre des valeurs fractionnaires dans le problème relaxé.

L'introduction de la flexibilité au niveau des fenêtres de temps permet de réduire dans certains cas les coûts. Le scénario 3A constitue toutefois une exception; en effet, son coût est significativement supérieur à celui du scénario 1A bien qu'il permette une flexibilité de cinq minutes sur les fenêtres de temps. Ceci s'explique par le fait que la phase de sélection a permis de trouver des solutions de valeur à peu près égale. Toutefois, la solution du scénario 1A utilisant deux chauffeurs en temps supplémentaire a vu ceux-ci se faire retirer du temps lors de l'insertion des activités à points de demande variables. Le scénario 4A constitue lui aussi une exception car son coût est significativement supérieur à celui du scénario 2A. Cette situation trouve toutefois sa justification dans le fait que le scénario 2A à vu certains chauffeurs à temps partiel travaillant au delà du minimum garanti se faire retirer du temps lors de l'insertion de la demande variable.

Lorsque l'on fait varier la contrainte sur la durée minimale d'une tâche à points de demande variables, on constate que plus on augmente cette valeur, plus les coûts augmentent. Le scénario 5C constitue toutefois une exception s'expliquant de la même façon que le scénario 3A.

Suite à l'examen du tableau 5.4, il semble que le modèle réagit de façon satisfaisante lors de la variation des divers paramètres bien que l'on retrouve trois exceptions.

Le tableau 5.5 pour sa part, nous permet de constater qu'il y a toujours un écart important entre la valeur de la solution entière et celle du problème relaxé de ces contraintes d'intégralité (i.e. la valeur de la solution à la racine de l'arbre). Cela entraîne la création d'arbres de branchement de tailles importantes comme le démontrent les diverses statistiques. En effet, la valeur d'une solution entière donnée permet uniquement d'éviter l'exploration des niveaux inférieurs de l'arbre. L'introduction des coupes à la racine de l'arbre permet de réduire sensiblement la taille de l'arbre et de trouver rapidement une solution entière. Dans la plupart des cas, le branchement le plus utilisé est celui sur des sommes fractionnaires de variables associées à des chauffeurs à temps partiel d'un port d'attache, ceci étant probablement dû au fait que les coupes n'ont porté que sur les chauffeurs à temps plein. Ces coupes perdent de leur efficacité dans les scénarios où l'on exige un faible pourcentage de chauffeurs à temps plein car elles restreignent moins le domaine réalisable.

On remarque de plus dans ce tableau que lors d'une réoptimisation, la valeur de la solution du problème relaxé est plus grande. Ceci est

logique car on a retiré de l'ensemble précédent un certain nombre de journées.

5.4 Étude de divers scénarios : Expérience no 2

Dans cette section, nous désirons compléter les scénarios présentés précédemment par quelques autres. Chacun de ces scénarios présentent les mêmes caractéristiques que le scénario 1A de l'expérience no 1 avec toutefois les différences suivantes :

Scénario 9 : même pourcentage de chauffeurs à temps plein que dans la solution manuelle, soit un minimum de 82,5%.

Scénario 10 : scénario 9 modifié en changeant les cadres-horaires des relais afin qu'il ne soit possible d'affecter qu'une seule tâche d'un tel type à un chauffeur.

Scénario 11 : scénario 9 modifié en diminuant la vitesse de déplacement à vide à 25 km/h.

Scénario 12 : scénario 9 modifié en mettant les levées sous la responsabilité commune de plusieurs ports d'attache (voir tableau 5.1).

Les résultats de ces quatre scénarios sont résumés dans les tableaux 5.6 et 5.7. Si on compare la valeur de la solution du scénario 9 à la solution manuelle, l'heuristique a permis une réduction des coûts de l'ordre de 3,5%. Cette réduction a été en grande partie réalisée grâce à l'affectation de plus d'un relais à un même chauffeur. Le scénario 10 vient renforcer cette affirmation; en effet, en forçant la réalisation d'un seul relais par

Tableau 5.6 : Statistiques générales : Expérience no 2

SCENARIO	DIR. SEL.	NBVAR	TPA	TPL (SUPP)	TOTAL	EXC. VAR.	COUT	REND.	NB. FLEX.	CPU G-S-I
MANUEL	---	-----	15	72 (0)	87	0	17517	0.82	0	- - - - - - - - -
9	17.5-82.5	485	14	66 (2)	80	2	16905	0.90	0	23.8-1903.0-15.5
10	17.5-82.5	513	15	71 (0)	86	22	17375	0.86	0	24.5-446.1-16.2
11	17.5-82.5	491	14	69 (4)	83	34	17455	0.89	0	24.3-1910.0-15.6
12	17.5-82.5	585 (94)	14	67 (0)	81	57	16973	0.90	0	47.0-1953.6-15.5

Tableau 5.7 : Statistiques sur la phase de sélection :

Expérience no 2

SCEN	ALPHA	SLN REEL	SLN COUPE	SLN ENT.	MAJ SLN	STATS ARBRE	STATS BRANC.	CPU	
9	0.00	12192	12662	12662 (0.0%)	1 (-)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	32.7	%
	0.25	12192	12546	12662 (0.92%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	47.7	R
	0.50	12192	12301	12387 (0.63%)	2 (2.17%)	70-35-21-6	2-2-13-3-14	253.3	% *
	0.75	12192	12195	12387 (1.15%)	0 (0.0%)	370-185-15-48	14-14-112-35-9	1542.1	T *
10	0.00	12643	12732	12809 (0.6%)	1 (-)	12-6-6-1	2-1-1-0-1	49.3	%
	0.25	12643	12697	12809 (0.88%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	102.0	R *
	0.50	12643	12653	12809 (1.23%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	84.4	R *
	0.75	12643	12643	12809 (0.86%)	0 (0.0%)	40-20-19-2	2-1-13-3-0	182.4	% *
11	0.00	12720	13238	13261 (0.17%)	1 (-)	14-7-7-1	1-2-1-1-1	51.7	%
	0.25	12720	13086	13141 (0.42%)	1 (0.9%)	36-18-18-4	1-2-3-1-10	156.8	% *
	0.50	12720	12821	12972 (0.96%)	2 (1.29%)	132-66-25-13	3-5-23-6-28	310.0	%
	0.75	12720	12720	12972 (1.48%)	0 (0.0%)	392-196-16-56	4-15-128-31-17	1363.5	T *
12	0.00	12207	12707	12739 (0.25%)	1 (-)	26-13-13-1	3-1-4-2-2	80.0	%
	0.25	12207	12339	12474 (0.99%)	1 (2.08%)	322-161-25-45	3-14-53-7-83	1260.1	% *
	0.50	12207	12245	12474 (1.79%)	0 (0.0%)	120-60-21-23	2-2-28-0-27	536.1	T *
REOPT	0.50	12403	12451	12474 (0.18%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	6.4	R
	0.75	12403	12413	12474 (0.49%)	0 (0.0%)	2-1-1-1	0-0-0-0-0	6.4	R
	1.00	12403	12403	12468 (0.51%)	1 (0.04%)	16-8-5-4	1-2-0-3-1	23.1	%

un même chauffeur, les gains n'ont été que de 0,8%. Ces résultats sont en accord avec la figure 5.1 indiquant que l'exécution des relais constitue la période de pointe de la journée. Le scénario 11 nous montre qu'une réduction de la vitesse entraîne une augmentation des coûts. Finalement, le scénario 12 ne permet pas de faire ressortir les avantages à réaffecter les levées même si on s'attend à de telles avantages dû au fait que la solution du scénario 9 est réalisable pour le scénario 12.

CONCLUSION

Le modèle de recouvrement avec contraintes supplémentaires proposé pour le problème d'élaboration des horaires des chauffeurs de véhicules postaux permet donc d'obtenir de bons résultats. Il permet d'évaluer aisément les coûts de plusieurs scénarios d'opérations et peut s'avérer un outil de travail fort utile pour planifier les activités postales d'un secteur donné.

Ce modèle permet de considérer aisément des contraintes de niveau global tel que le ratio entre le nombre de chauffeurs à temps plein et à temps partiel par exemple. La souplesse du modèle mathématique retenu permet de facilement envisager le traitement de contraintes globales autres que celles présentées dans ce mémoire. De plus, l'addition de nouvelles contraintes au niveau de la structure des journées de travail des chauffeurs peut être facilement envisagée étant donné la simplicité du processus générant ces dernières.

Nous avons donc réalisé dans ce mémoire une première version d'un système permettant de traiter le problème. On peut toutefois y envisager quelques améliorations. Entre autres, au niveau de la phase de génération des journées de travail, il serait pertinent de maximiser le temps de disponibilité pour les activités à points de demande variables dans chaque journée de travail tout en réalisant toutes les tâches qu'elle comporte. Une telle modification pourrait influencer le choix des journées de travail lors de la phase de sélection et réduire ainsi le coût de la solution.

D'autre part, il serait intéressant de tester le modèle sur d'autres secteurs postaux ayant une plus forte activité que le secteur traité ici.

Ceci permettrait de mieux évaluer les limitations du modèle et de la méthode de résolution proposée. Par ailleurs, les travaux de Desrochers [3] permettent d'envisager la possibilité de développer une méthode de type génération de colonnes pour résoudre le modèle de recouvrement que nous proposons. Une telle méthode permettrait d'obtenir des solutions plus exactes, mais en des temps d'exécution plus élevés.

Nous avons donc atteint notre objectif qui était de développer les bases d'un modèle permettant l'élaboration d'horaires des chauffeurs de véhicules postaux. Plusieurs modifications et améliorations pourront y être apportées dans l'avenir afin de mieux répondre au besoin des éventuels utilisateurs.

APPENDICE

A) Programme d'opérations manuel.

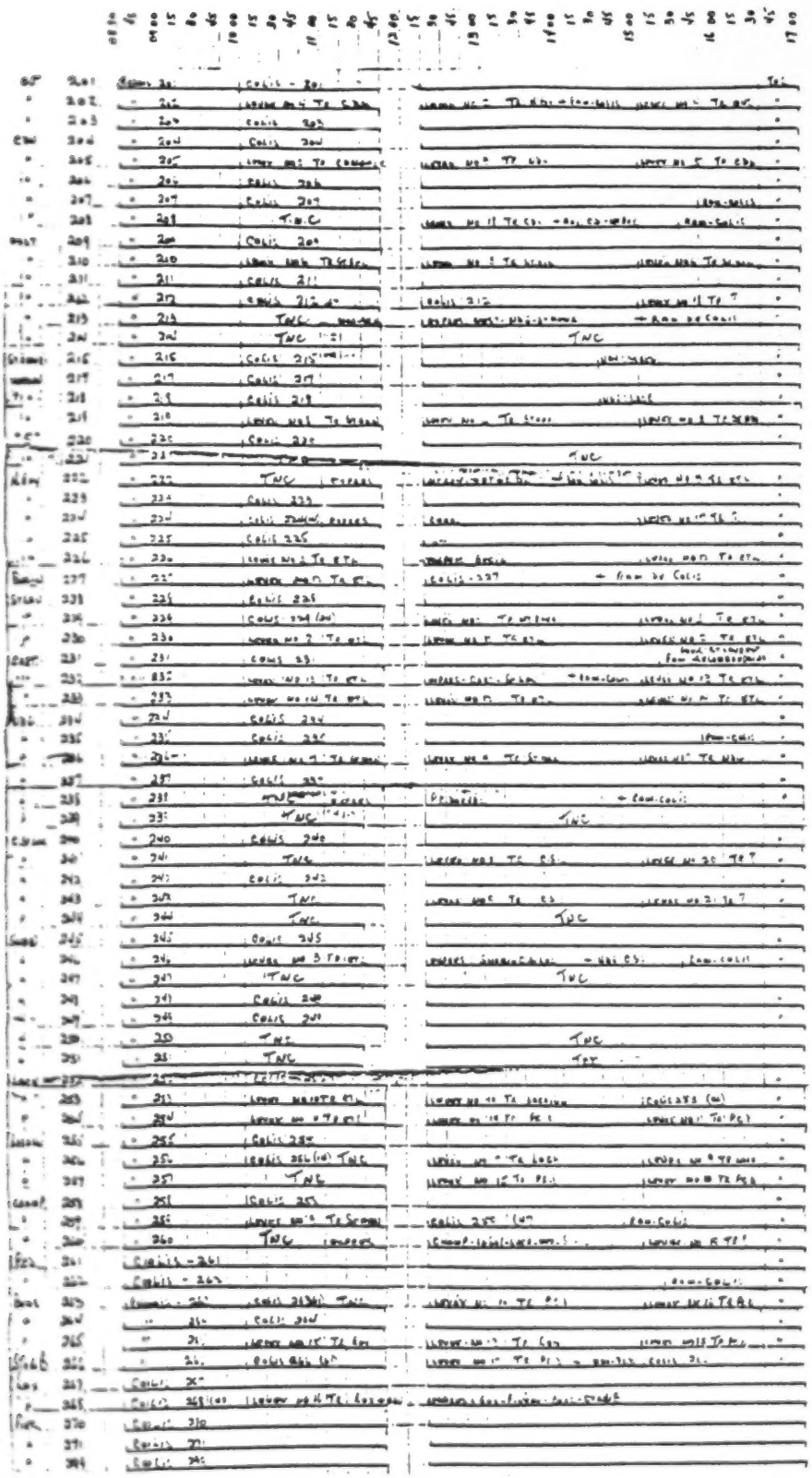
B) Organigramme des divers modules du système.

C) Programme d'opérations informatisé.

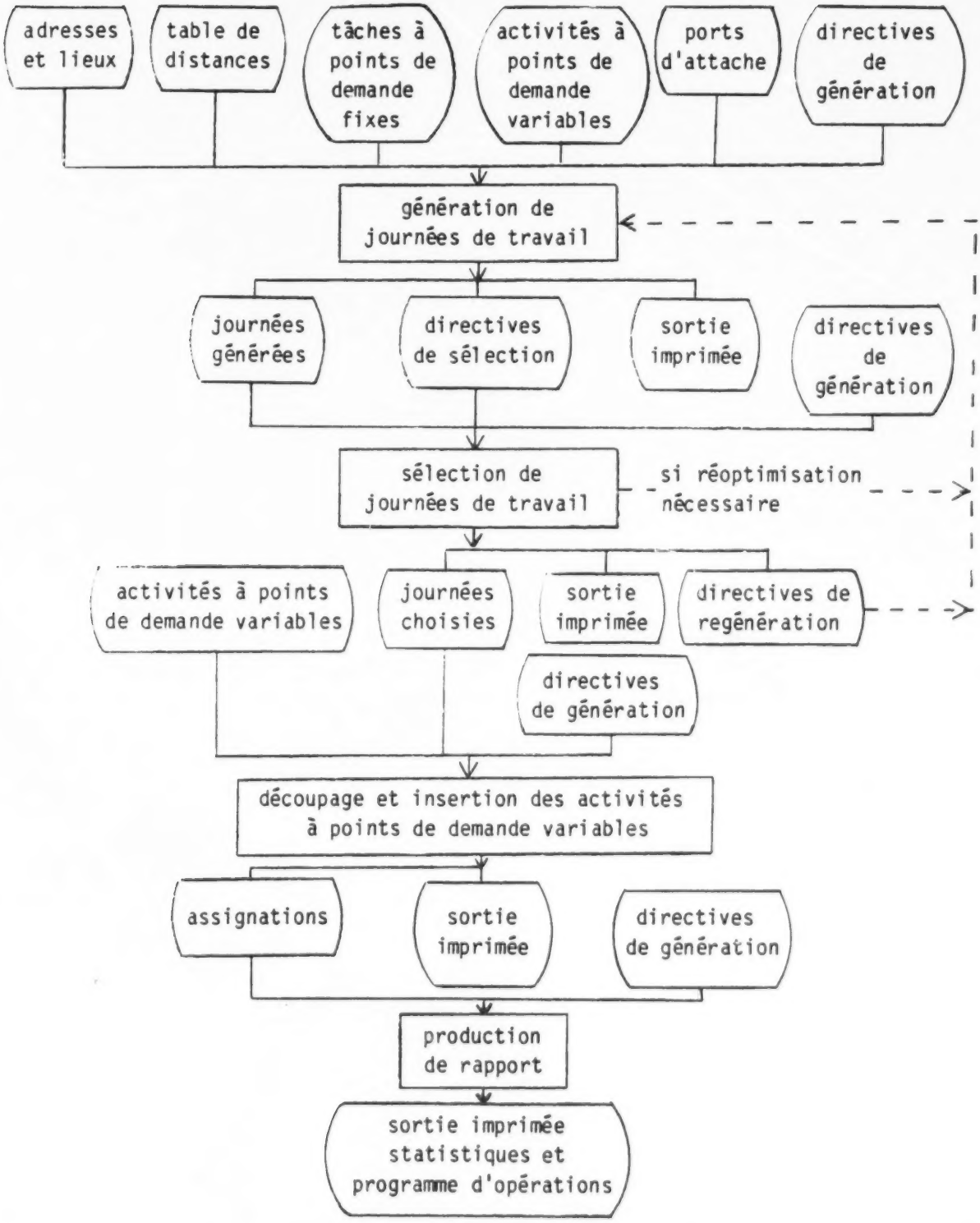
D) Description détaillée des journées de travail de chauffeurs.

E) Statistiques diverses sur les journées de travail de chauffeurs.

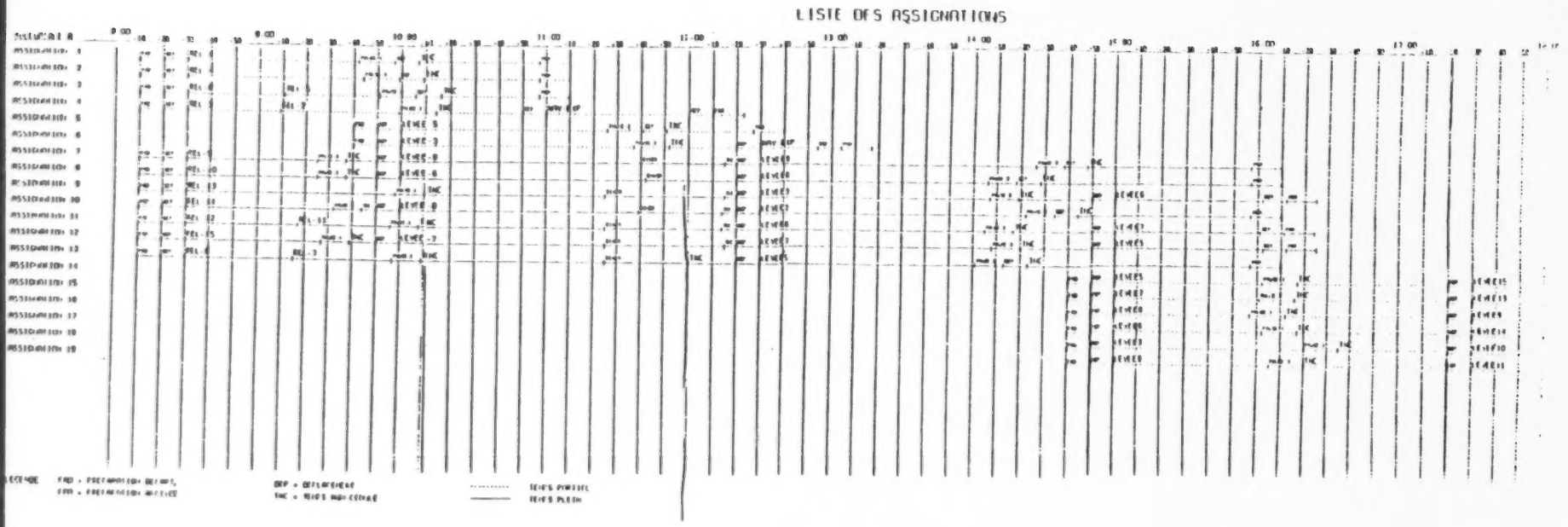
A) Programme d'opérations manuel



B) Organigramme des divers modules du système



C) Programme d'opérations informatisé



D) Description détaillée des journées de travail de chauffeurs

ASSIGNATION # 1 - TEMPS PLEIN

PREPARATION DEP.	8:05	8:15	3035 HOCHELAGA	(GARAGE HOCHELAGA)		3035 HOCHELAGA	(GARAGE HOCHELAGA)	
DEPLACEMENT	8:15	8:30	3035 HOCHELAGA	(GARAGE HOCHELAGA)		736 SIE CECILE	(1ERE BOITE)	
RELAIS NO. 1	8:30	9:42	736 SIE CECILE	(1ERE BOITE)		990 NOTRE DAME	O (DERNIERE BOITE)	
PAUSE-1	9:42	9:54						
DEPLACEMENT	9:55	10:00	990 NOTRE DAME	O (DERNIERE BOITE)		1470 ST DENIS	(1ERE BOITE)	
LEVEE NO. 3	10:00	11:37	1470 ST DENIS	(1ERE BOITE)		1500 OTTAWA	(E.T.L)	
DINER	11:37	12:12						
DEPLACEMENT	12:26	12:30	1500 OTTAWA	(E.T.L)		2015 PEEL	(1ERE BOITE)	
LEVEE NO. 7	12:30	14:08	2015 PEEL	(1ERE BOITE)		1500 OTTAWA	(E.T.L)	
PAUSE-2	14:08	14:20						
DEPLACEMENT	14:56	15:00	1500 OTTAWA	(E.T.L)		1197 UNIVERSITY	(1ERE BOITE)	
LEVEE NO. 6	15:00	16:02	1197 UNIVERSITY	(1ERE BOITE)		1500 OTTAWA	(E.T.L)	
DEPLACEMENT	16:08	16:22	1500 OTTAWA	(E.T.L)		3035 HOCHELAGA	(GARAGE HOCHELAGA)	
PREPARATION ARR.	16:22	16:35	3035 HOCHELAGA	(GARAGE HOCHELAGA)		3035 HOCHELAGA	(GARAGE HOCHELAGA)	

ASSIGNATION # 2 - TEMPS PLEIN

PREPARATION DEP.	8:05	8:15	3035 HOCHELAGA	(GARAGE HOCHELAGA)		3035 HOCHELAGA	(GARAGE HOCHELAGA)	
DEPLACEMENT	8:15	8:30	3035 HOCHELAGA	(GARAGE HOCHELAGA)		1409 PEEL	(1ERE BOITE)	
RELAIS NO. 2	8:30	9:20	1409 PEEL	(1ERE BOITE)		1242 PEEL	(DERNIERE BOITE)	
DEPLACEMENT	9:20	9:21	1242 PEEL	(DERNIERE BOITE)		1467 MANSFIELD	(1ERE BOITE)	
RELAIS NO. 3	9:21	10:00	1467 MANSFIELD	(1ERE BOITE)		1781 MCGILL COLLEGE	(DERNIERE BOITE)	
PAUSE 1	10:00	10:12						
DEPLACEMENT	10:12	10:14	1781 MCGILL COLLEGE	(DERNIERE BOITE)		1133 MANSFIELD	(1ERE BOITE)	
LEVEE NO. 8	10:14	11:53	1133 MANSFIELD	(1ERE BOITE)		1500 OTTAWA	(E.T.L)	
DINER	11:53	12:28						
DEPLACEMENT	12:28	12:31	1500 OTTAWA	(E.T.L)		740 NOTRE DAME	O (1ERE BOITE)	
LEVEE NO. 5	12:31	14:02	740 NOTRE DAME	O (1ERE BOITE)		1500 OTTAWA	(E.T.L)	
PAUSE-2	14:02	14:14						
COLIS 15	14:14	16:08						
DEPLACEMENT	16:08	16:22	1500 OTTAWA	(E.T.L)		3035 HOCHELAGA	(GARAGE HOCHELAGA)	
PREPARATION ARR.	16:22	16:35	3035 HOCHELAGA	(GARAGE HOCHELAGA)		3035 HOCHELAGA	(GARAGE HOCHELAGA)	

E) Statistiques diverses sur les journées de travail de chauffeurs

DISTRIBUTION DES JOURNEES PAR TEMPS PAYE

INTERVALLE	TEMPS PARTIEL	TEMPS PLEIN	TOTAL
2:30- 3:00	5	0	5
3:00- 3:30	3	0	3
3:30- 4:00	3	0	3
4:00- 4:30	4	0	4
4:30- 5:00	0	0	0
7:30- 8:00	1	65	66
	16	65	81

DISTRIBUTION DES JOURNEES PAR SUCCURSALE

	TEMPS PARTIEL	TEMPS PLEIN	TOTAL
SUCCURSALE K	2	3	5
SUCCURSALE M	2	2	4
ROSEMONT	1	2	3
BEAUBIEN	0	3	3
DELORIMIER	0	3	3
SUCCURSALE R	0	4	4
SUCCURSALE C	1	3	4
SUCCURSALE E	0	2	2
SUCCURSALE N	0	4	4
PLACE D'ARMES	1	3	4
ILE-DES-SOEURS	0	1	1
SUCCURSALE H	1	5	6
SUCCURSALE F	0	1	1
SUCCURSALE D	1	0	1
SUCCURSALE A	0	11	11
CHABANEL	7	18	25
	16	65	81

E) Statistiques diverses sur les journées de travail de chauffeurs (suite)

CARACTERISTIQUES DES JOURNEES

#JR	TENC UTILE	TENC INUTILE	TEMPS PAYE	TEMPS NON-PAYE	RENDEMENT	COUT
1	0	57	480	30	.88	$228.55
2	0	0	480	30	1.00	$247.55
3	0	8	480	30	.98	$244.88
4	0	0	480	30	1.00	$247.54
5	0	0	480	30	1.00	$247.54
6	0	41	480	38	.91	$233.88
7	0	12	480	30	.98	$243.55
8	0	0	480	30	1.00	$247.55
9	0	10	480	30	.98	$244.21
10	0	45	480	30	.91	$232.55
11	0	33	480	30	.93	$236.55
12	0	0	252	0	1.00	$123.55
13	0	0	480	30	1.00	$247.54
14	0	0	480	33	1.00	$247.55
15	0	0	480	30	1.00	$247.54
16	0	0	180	0	1.00	$ 90.33
17	0	0	480	30	1.00	$251.21
18	0	41	480	30	.91	$237.55
19	0	0	480	30	1.00	$251.21
20	0	0	480	30	1.00	$251.21
21	0	23	480	30	.95	$243.54
22	0	0	480	30	1.00	$251.21
23	0	0	480	30	1.00	$251.22
24	0	0	480	30	1.00	$251.21
25	134	13	480	30	.69	$202.21
26	0	0	280	0	1.00	$143.99
27	162	17	480	30	.63	$191.55
28	126	0	480	30	.74	$209.22
29	0	0	480	30	1.00	$251.21
30	0	0	480	30	1.00	$251.21
31	0	0	480	30	1.00	$251.21
32	146	0	480	30	.70	$202.54
33	0	11	480	30	.98	$247.55
34	0	0	480	30	1.00	$251.22
35	88	0	480	30	.82	$221.88
36	0	0	480	30	1.00	$247.55
37	143	0	480	30	.70	$199.88
38	91	27	480	30	.75	$208.21
39	0	0	180	0	1.00	$ 90.33
40	0	0	480	30	1.00	$251.21
41	0	0	480	30	1.00	$251.21
42	0	8	480	30	.98	$248.55
43	0	0	201	0	1.00	$100.39
44	0	10	480	30	.98	$247.88
45	0	30	480	30	.94	$241.21
46	0	0	180	0	1.00	$ 90.33
47	0	0	298	0	1.00	$153.92
48	0	18	480	30	.96	$245.22
49	0	0	480	30	1.00	$251.21
50	0	0	180	0	1.00	$ 90.33
51	0	0	234	0	1.00	$118.60
52	0	0	480	30	1.00	$251.21
53	0	0	480	30	1.00	$251.22
54	0	12	480	30	.98	$247.21
55	0	0	480	30	1.00	$251.21
56	161	0	480	30	.66	$197.54
57	0	28	180	0	.84	$ 75.66
58	0	0	256	0	1.00	$122.57
59	0	0	300	0	1.00	$146.85
60	0	0	203	0	1.00	$ 93.32
61	0	0	203	0	1.00	$ 93.33
62	0	10	279	0	.96	$131.92
63	0	10	225	0	.96	$102.12
64	0	33	480	30	.93	$234.88
65	0	31	480	30	.94	$235.54
66	0	27	480	30	.94	$236.88
67	0	38	480	30	.92	$233.22
68	0	19	480	30	.96	$239.55
69	0	19	480	30	.96	$239.54
70	0	19	480	30	.96	$239.55
71	0	19	480	30	.96	$239.54
72	0	102	480	30	.79	$211.88
73	0	99	480	30	.79	$212.88
74	0	102	480	30	.79	$211.88
75	0	102	480	30	.79	$211.88
76	0	104	480	30	.78	$211.22
77	0	148	480	30	.69	$196.55
78	153	103	480	30	.47	$160.55
79	153	103	480	30	.47	$160.55
80	153	122	480	30	.43	$154.21
81	99	115	480	30	.55	$174.55
	1609	1769	34831	1961	.90	$ 16828.04

E) Statistiques diverses sur les journées de travail de chauffeurs (suite)

TEMPS CONSACRE A CHAQUE TACHE (MIN. ,%)

BASS	NB. TACHES	COLIS	LEVEE	RELAIS	NAVETTE	LIV. SPEC.	RAM. COL.	PAUSE	DEPL.	PREP.	TENC	TOTAL
1	4	0 .0%	257 50.4%	72 14.1%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	42 8.2%	23 4.5%	57 11.2%	510 100.0%
2	4	114 22.4%	190 37.3%	89 17.5%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	35 6.9%	23 4.5%	0 .0%	510 100.0%
3	5	0 .0%	247 48.4%	74 14.5%	60 11.8%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	37 7.6%	23 4.5%	8 1.6%	510 100.0%
4	1	346 67.8%	0 .0%	55 10.8%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	27 5.3%	23 4.5%	0 .0%	510 100.0%
5	1	346 67.8%	0 .0%	55 10.8%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	27 5.3%	23 4.5%	0 .0%	510 100.0%
6	5	0 .0%	261 50.4%	86 16.6%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	67 12.9%	40 7.7%	23 4.4%	41 7.9%	518 100.0%
7	4	87 17.1%	177 34.7%	88 17.3%	24 4.7%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	40 7.8%	23 4.5%	12 2.4%	510 100.0%
8	1	339 66.5%	0 .0%	62 12.2%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	27 5.3%	23 4.5%	0 .0%	510 100.0%
9	1	333 65.3%	0 .0%	57 11.2%	0 .0%	0 0%	0 .0%	59 11.6%	28 5.5%	23 4.5%	10 2.0%	510 100.0%
10	5	0 .0%	257 50.4%	87 17.1%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	37 7.6%	23 4.5%	45 8.8%	510 100.0%
11	5	0 .0%	271 53.1%	81 15.9%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	43 8.4%	23 4.5%	33 6.5%	510 100.0%
12	1	138 54.8%	0 .0%	51 20.2%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	15 6.0%	25 9.9%	23 9.1%	0 .0%	252 100.0%
13	1	349 68.4%	0 .0%	54 10.6%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	25 4.9%	23 4.5%	0 .0%	510 100.0%
14	2	266 51.9%	72 14.0%	61 11.9%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	62 12.1%	29 5.7%	23 4.5%	0 .0%	513 100.0%
15	3	91 17.8%	213 41.8%	90 17.6%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	34 6.7%	23 4.5%	0 .0%	510 100.0%
16	1	63 35.0%	0 .0%	84 46.7%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	15 8.3%	6 3.3%	12 6.7%	0 .0%	180 100.0%
17	1	366 71.8%	0 .0%	71 13.9%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	2 .4%	12 2.4%	0 .0%	510 100.0%
18	5	0 .0%	283 55.5%	89 17.5%	15 2.9%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	11 2.2%	12 2.4%	41 8.0%	510 100.0%
19	2	165 32.4%	152 29.8%	116 22.7%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	6 1.2%	12 2.4%	0 .0%	510 100.0%
20	1	342 67.1%	0 .0%	92 18.0%	0 .0%	0 .0%	0 .0%	59 11.6%	5 1.0%	12 2.4%	0 .0%	510 100.0%

RÉFÉRENCES

[1] BODIN, L., ASSAD, A., BALL, M. et GOLDEN, B. (1983). "The State of the Art in Routing and Scheduling of Vehicles and Crews", Computers and Operations Research, 10, 69-211.

[2] CARPANETO, G., TOTH, P. (1980). "Some New Branching and Bounding Criteria for the Asymmetric Travelling Salesman Problem". Management Science, 26, 736-743.

[3] DESROCHERS, M. (1986). "La fabrication d'horaires de travail pour les conducteurs d'autobus par une méthode de génération de colonnes", Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, publication #470.

[4] DESROSIERS, J., SOUMIS, F. et DESROCHERS, M. (1984). "Routing with Time Window by Column Generation", Networks, 14, 545-565.

[5] DESROSIERS, J. (1979). "Le transport scolaire : les horaires d'écoles et les circuits d'autobus", Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, publication #140.

[6] DESROSIERS, J., PELLETIER, P. et SOUMIS, F. (1983). "Plus court chemin avec contraintes d'horaires", RAIRO, 17, 355-377.

[7] DESROSIERS, J., DUMAS, Y. et SOUMIS, F. (1986). "The Multiple Vehicle Many to Many Routing Problem with Time Windows". Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, publication #362.

[8] DUMAS, Y. (1985). "Confection de routes de véhicules pour le transport de plusieurs origines à plusieurs destinations". Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, publication #434.

[9] FERLAND, J.A. (1985). "The Single Depot Vehicle Scheduling Problem". Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, publication #385.

[10] GRIGORIADIS, M., HSU, T. (1979). "The Rutgers Minimum Cost Network Flow Subroutines", SIGMAP, 26, 17-18.

[11] LAVOIE, S. (1985). "Optimisation des horaires d'équipages d'avions". Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, publication #400.

[12] MALLETTE, C., LAPALME, G. (1982). "Guide d'utilisation des 'area master files'". Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, publication #273.

[13] MARSTEN, R.E. "The XMP Mathematical Programming Library". Department of Management Information Systems, University of Arizona.

[14] ROACK, A.L. et PAYET, J.C. (1975). "Scheduling of Postal Truck Drivers". Papier présenté au "Workshop on Automated Techniques for Scheduling of Vehicle Operators for Urban Public Transportation Services, ORSA".

[15] ROUSSEAU, J-M. (1982). "Crew Scheduling Methods in Operational Planning of Transportation Systems". Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, publication #263.

[16] ROY, S., ROUSSEAU, J-M., MALLETTE, C., LAPALME, G., FERLAND, J. et CHAPLEAU, L. (1985) "Élaboration des routes et horaires de véhicules pour le transport adapté : Manuel d'analyste et programmes informatiques". Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, publication #413F.

REMERCIEMENTS

Je désire tout d'abord exprimer ma gratitude à mon directeur de recherche, Monsieur Jacques Ferland, pour m'avoir conseillé et aidé tout au long de la réalisation de ce mémoire de maîtrise. Je suis de plus reconnaissant envers Monsieur Eric Landry, chargé de projet à la Société canadienne des postes, pour m'avoir proposé ce sujet de maîtrise, son appui et ses encouragements ont été grandement appréciés. Je remercie la Société canadienne des postes pour son implication financière dans le projet; de même que le Centre de recherche sur les transports et son directeur, Monsieur Jean-Marc Rousseau, pour toutes les facilités mises à ma disposition. Mes remerciements vont aussi à Mlle Carole Laflamme pour son excellent travail de dactylographie. Je suis, de plus, reconnaissant envers tous ceux qui, par leurs questions, leurs conseils et leur temps, ont pu m'aider dans la réalisation de ce mémoire, notamment messieurs Jacques Desrosiers, Yvan Dumas, Serge Roy et Michel Sauvé.

Et finalement, un merci tout spécial à mon amie Chantal.